Unterkühlung und Kältetod der Pflanzen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen philosophischen Fakultät

der

Vereinigten Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Hans Voigtlaender
aus Neundorf (Herzogtum Anhalt).

Halle a. S.
1909.

Referent: **Prof. Dr. Mez.**

Tag der mündlichen Prüfung: **14. November 1908.**

Sonderabdruck aus „Beiträge zur Biologie der Pflanzen“ Band IX, Heft 3.

Meinen Eltern!

Vorliegende Arbeit wurde auf Anregung und unter Leitung des Herrn Prof. Dr. Mez, der mir auch die ihm gehörenden Apparate gütigst zur Verfügung stellte, ausgeführt; es sei mir gestattet, für die ständig mir zuteil gewordene liebenswürdige Unterstützung auch an dieser Stelle herzlichst zu danken.

Die Untersuchungen über das Gefrieren der Pflanzen und die Aufdeckung der dabei in Betracht kommenden Gesetze haben in neuerer Zeit wesentliche Fortschritte gemacht. Nachdem durch Arbeiten von H. Müller-Thurgau[1]), sowie durch die Monographie von Molisch[2]) die Frage nach dem Erfriertod der Pflanzen ventiliert und die Ursache für diesen wesentlich auf physikalische Grundlage gestellt war, insofern als eine Gleichsetzung von Gefriertod und Austrocknungstod behauptet wurde, ist diese Anschauung vor allem durch Mez[3]) und die auf seine Anregung gemachten Arbeiten von Apelt[4]) und Rein[5]) erschüttert worden. Es wurde gezeigt, daß die Grundlagen, auf denen die physikalisch-mechanische Erfrierhypothese begründet war, nicht genügen. Insbesondere hat Mez[6]) darauf hingewiesen, daß die Menge des sich bildenden Eises in einer gefrierenden Pflanze keineswegs parallel mit dem Temperaturabfall geht. Es gibt viele Pflanzen, welche tief unter der Erstarrungstemperatur der eutektischen Lösung ihres im Zellsaft gelösten Salzgemisches erfrieren.

Durch Apelt[7]) wurde nachgewiesen, daß bei der Kartoffel, dem Typobjekt, welches zur physikalisch-mechanischen Gefrierhypothese geführt hatte, ein zwar kleines, aber mit feinen Instrumenten stets mit Sicherheit meßbares Intervall zwischen Gefrierpunkt und Erfrierpunkt liegt, sodaß also die von den vorhergehenden Autoren behauptete Übereinstimmung dieser beiden Punkte in Wirklichkeit nicht vorhanden ist.

---

[1]) H. Müller-Thurgau in Landwirtschaftl. Jahrbüchern IX (1880), XV (1886).

[2]) H. Molisch, Untersuchungen über das Erfrieren der Pflanzen (Jena 1897).

[3]) C. Mez, Flora oder Allgemeine bot. Zeitung, 94. Bd. (1905), Heft I.

[4]) A. Apelt, Neue Untersuchungen über den Kältetod der Kartoffel (in Cohns Beiträgen 1907).

[5]) R. Rein, Untersuchungen über den Kältetod der Pflanzen, in Zeitschrift für Naturwissensch., Bd. 80 (1908).

[6]) Mez, l. c. p. 92.

[7]) Apelt, l. c. p. 17.

Daß auch andere physikalische Bedingungen die Lage des Erfrierpunktes nicht bestimmen, hat Apelt[1]) insofern nachgewiesen, als nach seinen Untersuchungen der osmotische Druck in den Zellen keinerlei erkennbaren Einfluß auf die Lage des Erfrierpunktes besitzt.

Durch Rein[2]) wurden die Untersuchungen über das Verhältnis von osmotischem Druck und Erfrierpunkt in ausgedehnterem Maße fortgesetzt und bei einer größeren Anzahl von Pflanzen geprüft. Der von Apelt gefundene Satz fand seine Bestätigung.

Ferner fügt die Arbeit Reins[3]) unserer Erkenntnis den Satz hinzu, daß auch die Zellengröße, d. h. die kapillare Spannung, welche in dem Zellsaft herrscht, keinen erkennbaren Einfluß auf die Lage der Erfrierpunkte besitzt.

Dagegen wurde durch die Arbeit von Mez[4]) sowie durch die beiden zitierten Arbeiten scharf darauf hingewiesen, daß es sich beim Kältetod ebenso wie beim Hitzetod des Protoplasmas einzig und allein um spezifische Eigenschaften der Protoplasten der einzelnen Spezies handelt.

Diese Anschauung fand eine bedeutsame Bekräftigung durch den von Apelt[5]) geführten Nachweis, daß der Erfrierpunkt durch die vor dem Experiment auf die Pflanzen einwirkenden Wärmeverhältnisse variiert werden kann, sowie durch die Entdeckung Reins[6]), daß diese Variationsfähigkeit allein den Pflanzen kälterer Klimate, nicht aber denen der Tropen zukommt. Abgesehen von diesen kurz skizzierten Resultaten, ist für die Lehre vom Erfrieren der Pflanzen der von Rein[7]) experimentell festgestellte Satz von Wichtigkeit, daß keine Tropenpflanze, auch keine der allerempfindlichsten Arten, über -2^0 erfriert.

Um diesen Satz richtig zu verstehen und um ihn insbesondere mit den von früheren Autoren, vor allem von Molisch[8]) gewonnenen experimentellen Resultaten, daß Kältetod tatsächlich bei manchen Pflanzen schon über dem Nullpunkt eintritt, in Einklang zu bringen, war es notwendig, die bereits von Mez[9]) und Apelt[10]) gegebene Definition des Erfriertodes wieder aufzunehmen und scharf zwischen dem eigentlichen Erfriertod und einem den Beschluß einer infolge der Kälte eintretenden längeren oder kürzeren Krankheit bildenden Tode zu unterscheiden.

Abgesehen von den hier zitierten Arbeiten ist in der Zwischenzeit noch eine weitere von Gorke[11]) erschienen, welche sich insofern auf die physikalisch-mechanische Erfriertheorie stützt, als sie den Erfriertod zwar nicht in einem Ausfrieren des Wassers aus dem Protoplasma, wohl aber in einem Aussalzen der für das Leben notwendigen Eiweißstoffe sieht, also zwar die

---

[1]) Apelt, l. c. p. 20 ff. [2]) Rein, l. c. p. 9 ff. [3]) Rein, l. c. p. 18.
[4]) Mez, l. c. p. 96. [5]) Apelt, l. c. p. 12 ff. [6]) Rein, l. c. p. 27 ff.
[7]) Rein, l. c. p. 25. [8]) Molisch, l. c. p. 49—65.
[9]) Mez, l. c. p. 120, Anmerkung. [10]) Apelt, l. c. p. 6.
[11]) H. Gorke, Über chemische Vorgänge beim Erfrieren der Pflanzen, in Landwirtschaftlichen Versuchsstationen LXV, p. 149.

nicht mehr haltbare Theorie, daß der Erfriertod durch Ausfrieren des Wassers zustande komme, verläßt, an ihre Stelle aber eine außerordentlich ähnliche setzt, die sich auf die schwerst faßbaren und chemisch noch wenig bekannten Körper in der Pflanze, die Eiweißstoffe, bezieht.

Die Gesamtheit dieser Arbeiten hat gezeigt, daß bezüglich der theoretischen Grundlagen unsere Kenntnisse über das Erfrieren der Pflanzen noch in einer Anzahl von Punkten nicht genügend geklärt sind, und die Untersuchung mehrerer hierhergehöriger Fragestellungen wurde mir von Herrn Prof. Mez übertragen.

Die wichtigste Frage, welche ich zu behandeln hatte, war die, welchen Einfluß die Unterkühlung auf den Kältetod der Pflanzen ausübt. Ferner war es meine Aufgabe, einen Überblick über das Unterkühlungsphänomen in der Pflanze und den Grund seines Auftretens respektive Nichtauftretens zu erhalten. Bereits von früheren Autoren, insbesondere von Molisch[1]), gewonnene Resultate ließen es ferner wünschenswert erscheinen, darüber Klarheit zu bekommen. inwiefern die Gefrierpunkte und Erfrierpunkte verschiedener Gewebe innerhalb eines und desselben Pflanzenkörpers differieren. Endlich wurde die Frage, ob bei dem Gefrieren und Erfrieren der Pflanzen tatsächlich ein Aussalzen von Eiweißstoffen oder auch Fermenten irgendwie in Betracht kommt, einer experimentellen Prüfung unterworfen.

Die Bedeutung der Unterkühlung für den Kältetod der Pflanzen.

A. Das Unterkühlungsphänomen bei den Pflanzen.

a) Allgemeine Ausführungen über die Bedingungen für das Eintreten der Unterkühlung.

Über die Unterkühlung in Geweben der höheren Pflanzen wissen wir im allgemeinen nur[2]), daß sie bei Abkühlungsexperimenten außerordentlich häufig eintritt, und daß die Erforschung dieser Verhältnisse auf besondere Schwierigkeiten stößt, weil man im großen ganzen das Vermeiden oder Eintreten des Unterkühlungsphänomens nicht genügend in der Hand hat.

Um sich über die Unterkühlung von Pflanzenteilen Klarheit zu verschaffen, genügt es niemals, wenige Experimente zu machen, sondern nur eine sehr große Anzahl gibt die Möglichkeit, die Störungen, welche das Eintreten und die Tiefe der Unterkühlung beeinflussen, einigermaßen zu beseitigen.

Insbesondere ist es nicht möglich, wie Bachmetjew[3]) tut, auf regelmäßiges Ansteigen und Abfallen des Unterkühlungsgrades (vgl. p. 10) zu

---

[1]) Molisch, l. c. p. 30—33.

[2]) Müller-Thurgau in Landwirtschaftl. Jahrbüchern IX, p. 145, XV, p. 486; Molisch, l. c. p. 18; Mez, l. c. p. 98.

[3]) Bachmetjew, Experimentelle entomologische Studien I, p. 89 ff. (Leipzig 1901) und Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie, Bd. 67, p. 59 ff. (1900).

schließen, wenn man nur einige wenige Versuche angestellt hat. Die Angaben, die ich im folgenden mache, beziehen sich für jedes Objekt auf Serien von mindestens 50 Versuchen. Durch die große Zahl dieser Versuche hoffe ich über die Unsicherheit, welche auf dem Gebiete des Unterkühlungsphänomens der Pflanzen herrscht, hinweggekommen zu sein.

Für die Flüssigkeiten gilt der Satz, daß sie nicht tiefer unterkühlt werden können, als daß der bleibende Wärmerest noch genügt, um beim Gefrieren durch Produktion von Wärme die spezifische Gefriertemperatur wiederherzustellen[1]). Die Bemerkung Bachmetjews[2]), daß die Unterkühlung des Wassers, wie die Berechnung zeige, nur dann einen Anstieg beim Kristallisieren bis 0^0 erreicht, solange die Unterkühlung -80^0 nicht unterschreitet, — sei dies der Fall, so könne der Anstieg nur bis zu Temperaturen unter 0^0 gehen — ist in dieser Form nicht richtig.

Mit der Frage nach den in Organismen häufig sich zeigenden, nach tiefen Unterkühlungen eintretenden Temperaturdefekten hat sich Mez eingehend beschäftigt und den Satz aufgestellt, daß die Menge der „thermisch passiven" Substanzen im Körper der Organismen (Zellwände und andere feste Körper) für die Höhe des nach Unterkühlung eintretenden Temperatur-Anstiegs bestimmend ist. Von der bei Kristallisation der Flüssigkeiten (thermisch aktiver Substanzen) freiwerdenden Wärme wird je nach dem Abkühlungsgrad und der Menge der thermisch passiven Substanzen ein Teil zu deren Erwärmung verwendet; die Flüssigkeit wird also bei der Eisbildung nicht die spezifische Temperatur erreichen. Daß Bachmetjew diese Überlegung außer acht gelassen hat, erklärt seine unrichtigen Angaben.

Bezüglich der Lösungen eines und desselben Salzes von verschiedener Konzentration ist, was den Übersättigungspunkt[3]) anlangt (und diese Untersuchungen kann man ohne weiteres auf die Unterkühlung übertragen[4]), da Übersättigung in keiner Weise einen Ausnahmezustand der Lösung bedingt)[5]) durch Jaffé festgestellt worden, daß die Konzentration auf den Kristallisationspunkt — falls man die maximale Lebensdauer der übersättigten Lösung berücksichtigt — und damit auf den Unterkühlungspunkt keinen erkennbaren Einfluß besitzt. Doch bezieht sich dieser Satz nur auf durchaus homogene Flüssigkeiten, während jede Unterbrechung der Kontinuität durch Staubteilchen etc. in einer Lösung um so leichter die Erstarrung herbeiführt, je gesättigter sie ist[6]). Bei einer stark übersättigten Lösung genügen Staubteilchen von einer Kleinheit zur Einleitung des Kristallisationsvorganges, welche bei einer schwächer übersättigten Lösung die Erstarrung nicht einzuleiten vermögen[7]).

---

[1]) Mez, l. c. p. 116. [2]) Bachmetjew, Entomolog. Studien I, p. 80.

[3]) G. Jaffé, Studien an übersättigten Lösungen, in Zeitschrift für Physikalische Chemie, Bd. 43 (1903), p. 575.

[4]) W. Ostwald, Lehrbuch der allgemeinen Chemie, Bd. I, p. 1037.

[5]) W. Ostwald, Allg. Chemie I, 1038. [6]) G. Jaffé, l. c. p. 594.

[7]) G. Jaffé, l. c. p. 578.

Demnach ist die Ansicht Müller-Thurgaus[1]), wonach alle den Gefrierpunkt herabsetzenden Einflüsse, speziell auch die wachsende Konzentration der Lösungen, gleichfalls den Unterkühlungspunkt erniedrigen sollen, nicht zutreffend.

Sehen wir von der theoretischen Stellung des Problems ab und betrachten die Verhältnisse, wie sie in der Pflanze resp. im Zellsaft derselben vorliegen, so heißt das: Die Unterkühlung wird experimentell um so weniger tief getrieben werden können, je konzentrierter der Zellsaft ist, denn je gesättigter eine Lösung ist, um so geringere Störungen genügen, um die Kristallisation herbeizuführen[2]).

Wie diese Verhältnisse in der Pflanze liegen, davon wissen wir, abgesehen von einigen Angaben, die sich bei Mez[3]) finden, noch so gut wie nichts. In seinen Untersuchungen, welche das Unterkühlungsphänomen nur streiften, hat Mez festgestellt, daß die Unterkühlung der Säfte und Pflanzen gehindert resp. gemindert werde durch Luftgehalt der Zellsäfte, sowie durch einen Gehalt an schleimigen und gummiartigen Substanzen.

Diese Andeutungen nachzuprüfen und die gewonnenen Resultate zu erweitern, war von allgemeinerem Interesse.

b) Einfluß von Abkühlungsgeschwindigkeit und Erschütterungen auf die Unterkühlung in Pflanzen.

Will man das Unterkühlungsphänomen studieren, so wird man sich vor allem erst mit der Wirkung äußerer Einflüsse bekannt zu machen suchen, um durch sie entstehende Fehler möglichst vermeiden zu können.

Von vielen wird als hauptsächlichstes Moment die Abkühlungsgeschwindigkeit in Betracht gezogen. Nach vielen Angaben von physikalischer Seite[4]) ist langsame Abkühlung der Unterkühlung förderlich. Doch ist dieser Einfluß einer durch ungleichmäßige Abkühlung — das Gefäß mit der zu unterkühlenden Flüssigkeit tauchte direkt in die Kältemischung — bedingten Veränderung lokaler Temperatur-, Druck- und Konzentrationsverhältnisse zuzuschreiben, die einen Einfluß haben auf die Verschiebung der Grenze metastabil-labil[5]). Füchtbauer[6]), der mit reinen Stoffen und verdünnten Lösungen arbeitete, vermochte einen Einfluß der Abkühlungsgeschwindigkeit nicht zu konstatieren.

Von Forschern, die das Unterkühlungsphänomen an Organismen studiert haben, spricht sich Müller-Thurgau[7]) dahin aus, daß die Unterkühlung

---

[1]) H. Müller-Thurgau in Landwirtsch. Jahrbüchern IX, p. 185.

[2]) G. Jaffé, l. c. p. 594. [3]) Mez, l. c. p. 104.

[4]) S. u. a. Schaum u. Schönbeck, Drudes Annalen 8, p. 654; Rüdorff, Poggendorfs Annalen 115, p. 59.

[5]) W. Ostwald, Allgemeine Chemie II, p. 775.

[6]) Füchtbauer, Freiwillige Erstarrung unterkühlter Flüssigkeiten, in Zeitschrift für Physikalische Chemie, Bd. 48 (1904), p. 558.

[7]) H. Müller-Thurgau in Landwirtsch. Jahrbüchern IX (1880), p. 159.

proportional der Abkühlungsgeschwindigkeit steigt. Daß ich mich dieser Ansicht nicht anschließen kann, zeigen meine unten abgedruckten Tabellen; bei Müller-Thurgau ist über diesen Punkt, abgesehen von der ausgesprochenen Meinung, nichts positives, insbesondere nichts beweisendes zu finden. Beobachtungen führt er nicht an.

Am eingehendsten hat sich Bachmetjew[1]) mit der Feststellung der Beziehungen zwischen Unterkühlung und Abkühlungsgeschwindigkeit beschäftigt. Bachmetjew vergleicht den Unterkühlungsgrad — d. h. die Differenz zwischen dem Unterkühlungspunkt und dem normalen Erstarrungspunkt, bis zu dem die Temperatur bei der Eisbildung steigt — mit der Abkühlungsgeschwindigkeit. Nun kann aber von konstanter Abkühlungsgeschwindigkeit bei einem Unterkühlungsversuche, wie auch Bachmetjew[2]) schon betont, keine Rede sein; denn bei beginnender Unterkühlung geschieht der Temperaturabfall des Versuchsobjektes sehr rasch, verlangsamt sich aber vor allem bei tiefen Unterkühlungen gegen Ende des Versuches sehr, sodaß sich in der Nähe des Umkehrpunktes die Abkühlungsgeschwindigkeit, d. h. die Anzahl Temperaturgrade, um die das Objekt während einer Minute seinen Wärmezustand verringert, dem Werte 0 nähert. Dies Verhalten ist nicht nur theoretisch wenigstens teilweise verständlich, es tritt auch bei jedem Unterkühlungsversuche unzweideutig hervor. Ein Beispiel mag es erläutern. Bei einem Versuche mit *Verbascum phlomoides* brauchte das Objekt, um sich von 0^0 bis $-1{,}86^0$ abzukühlen, 16 Sekunden, während es gegen Ende desselben Versuchs das gleiche Temperaturintervall von $-11{,}16^0$ bis $-13{,}02^0$ in 83 Sekunden, also in einem über fünfmal so großen Zeitraum, zurücklegte. Der Einfluß der verschiedenen Temperaturdifferenz zwischen Objekt und Kältemischung zu Anfang und gegen Ende des Versuchs kommt für die Erklärung dieses Verhaltens zunächst in Betracht, vermag die Erscheinung aber meines Ermessens doch nicht völlig klarzustellen, da die benutzten Kältemischungen gewöhnlich eine Temperatur von -30^0 bis -40^0 C. aufwiesen, und außerdem auch bei geringeren Unterkühlungen, wo die Temperaturdifferenz zwischen Objekt und Kältemischung bei den starken Kältegraden der Mischung nicht in Frage kommt, die Abkühlungsgeschwindigkeit stark abnimmt, wie aus der umstehenden kleinen Tabelle I — sie gibt die Anzahl von Sekunden an, die das Objekt zur Zurücklegung der unter sich gleichen Temperaturintervalle braucht — hervorgeht.

Bachmetjew hat daher willkürlich als Abkühlungsgeschwindigkeit definiert: Die Anzahl Temperaturgrade, um die das unterkühlte Objekt seine Temperatur pro Minute erniedrigt, gerechnet von -4^0 C. an[3]).

Die Ergebnisse seiner Untersuchungen — Bachmetjew machte seine Studien an Insekten — faßt er dahin zusammen,

[1]) Bachmetjew, Entomolog. Studien I, p. 90—112; ders., Zeitschrift für wissensch. Zoologie 67, p. 529 ff.

[2]) Bachmetjew, Entomolog. Studien I, p. 90.

[3]) Bachmetjew, Entomolog. Studien I, p. 91.

Tabelle I.

Anzahl der Sekunden, welche dazu nötig waren, die Temperatur des Objekts in dem darüberstehenden Temperaturintervall zu erniedrigen.

Objekt	Temperaturintervalle				
	0° bis −1,86°	−1,86° bis −3,72°	−3,72° bis −5,58°	−5,58° bis −7,44°	−7,44° bis −9,33°
Verbascum phlomoides .	5″	12″	14″	17″	25″
= = .	11″	14″	15″	17″	21″
Hedera Helix	7″	10″	12″	13″	—
= = ...	15″	18″	18″	20″	29″
Yucca filamentosa . .	12″	14″	21″	24″	—
Helleborus hybridus .	13″	13″	16″	18″	27″
= = . .	18″	18″	24″	27″	36″
Yucca filamentosa . .	8″	12″	13″	—	—
= = . .	9″	10″	14″	—	—
Papaver pinnatifidum .	16″	20″	24″	—	—

1. daß bei mittlerer Abkühlungsgeschwindigkeit der Unterkühlungsgrad der Insektensäfte je nach der Natur derselben ein Minimum oder Maximum aufweist,

2. daß die extremen Unterkühlungsgrade bei verschiedenen Insekten verschieden sind, die Extreme aller Objekte jedoch bei fast ein und derselben Abkühlungsgeschwindigkeit liegen.

3. Später[1]) findet Bachmetjew, daß verschiedene Maxima und Minima bei einem Objekt existieren, der Unterkühlungsgrad also eine periodische Funktion der Abkühlungsgeschwindigkeit sei.

Bei meinen Untersuchungen bin ich in genau der gleichen Weise wie Bachmetjew verfahren. Nur lag der Punkt, von dem an ich die Abkühlungsgeschwindigkeit rechnete, nicht bei −4°, sondern bei −3,7°. Dies lag in der Versuchsanordnung; da bei Aufstellung der Temperaturkurve die Zeit von 20 zu 20 Skalenteilen von der Uhr abgelesen wurde, und der Skalenteil −40 einer Temperatur von −3,7° C. entsprach, mußte diese Änderung getroffen werden. Die Thermonadel wurde lackiert und vor jedem Versuch mit einem Wattebäuschchen sehr sorgfältig gereinigt. Das Schutzglas wurde von drei zu drei Versuchen oder noch öfter mit absolutem Alkohol ausgespült, um die an der Gefäßwandung befindlichen Eiskriställchen, die eine vorzeitige Erstarrung verursachen konnten, zu entfernen. Das angespießte Objekt mit Watte zu umhüllen zur Erreichung möglichst tiefer Unterkühlungen[2]), kann ich nach den Erfahrungen, die ich besonders bei meinen Versuchen mit interzellularenreichen und schleimigen Objekten machte, nicht als ein die Unterkühlung förderndes Mittel ansprechen.

[1]) Bachmetjew, l. c. p. 110.

[2]) Kodis in Zentralblatt für Physiologie 12, p. 593 (1898); Müller-Thurgau in Landwirtsch. Jahrbücher IX (1880), p. 118.

Die oben angeführten Sätze Bachmetjews habe ich bei Pflanzen nachgeprüft resp. zu bestätigen gesucht, jedoch in keiner Weise Beziehungen ähnlicher Art feststellen können.

Der größte resp. kleinste Unterkühlungsgrad liegt bald bei hoher, bald bei mittlerer, bald bei geringerer Abkühlungsgeschwindigkeit.

Tabelle II.

Objekt	Maximum des Unterkühlungsgrades Skalenteile	Abkühlungsgeschwindigkeit pro′	Minimum des Unterkühlungsgrades Skalenteile	Abkühlungsgeschwindigkeit pro′
Verbascum phlomoides . .	— 77	9,5°	— 31	9,5°
Hedera Helix	— 56	6,3°	— 15	6,7°
Yucca filamentosa . . .	— 41	6,0°	— 8	8,1°
Rumex obtusifolius . . .	— 77	5,4°	— 26	3,8°
Sedum spectabile . . .	— 104	5,2°	— 40	6,0°
Sedum purpurascens . .	— 112	5,0°	— 66	6,3°
Helleborus hybridus . .	— 42	4,8°	— 15	6,3°
Papaver pinnatifidum . .	— 76	4,6°	— 37	4,2°
Rhododendron canadense .	— 41	4,4°	— 17	3,9°

Daß hier weder Maxima noch Minima des Unterkühlungsgrades bei auch nur annähernd gleicher Abkühlungsgeschwindigkeit liegen, geht wohl klar hervor. Damit fallen zugleich die beiden anderen Gesetze Bachmetjews. Aber auch bei gleicher Abkühlungsgeschwindigkeit differiert der Unterkühlungsgrad meist sehr, wie die folgende Tabelle III (siehe Anhang) zeigt.

Bachmetjew hat dies bei einzelnen Objekten ebenfalls gefunden — teils weist seine Tabelle überhaupt keine Regelmäßigkeit[1]) auf, teils ist bei gleicher Abkühlungsgeschwindigkeit der Unterkühlungsgrad verschieden[2]), teils sind bei gleichem Unterkühlungsgrad sehr verschiedene Abkühlungsgeschwindigkeiten vorhanden[3]); er hat dies durch starke Individualität und mehr oder weniger vorgeschrittenes Entwicklungsstadium zu erklären versucht. Wer immer aber mit Unterkühlungsversuchen zu tun gehabt hat, wird mir zustimmen, wenn ich es für höchst wahrscheinlich halte, daß diese Unstetigkeiten durch äußere Zufälligkeiten bedingt sind, die bei reinen Salzlösungen nicht immer mit Sicherheit, bei der Untersuchung von Organismen aber sehr schwer fernzuhalten sind. Abgesehen von meinen bei Pflanzen gewonnenen durchaus abweichenden Resultaten stütze ich meine Ansicht darauf, daß die Zahl der von Bachmetjew jeweils mit einem Objekte unternommenen Versuche eine viel zu geringe war, um überhaupt ein sicheres Resultat zu ermöglichen. Er verfährt bei der Verwertung seiner Versuche ganz willkürlich, bisweilen zieht er Schlüsse aus zwei Versuchen[4]), ein andermal zieht er „aus Mangel

[1]) Bachmetjew, Entomolog. Studien I, p. 101 u. 94.
[2]) Ders. I, p. 104. [3]) Ders. I, p. 105, 106. [4]) Ders. I, p. 91, 92.

an Beobachtungsmaterial“ bei drei Versuchen keine Schlüsse[1]), ja er reiht die Beobachtungen (1 u. 3) von zwei verschiedenen Spezies aneinander, trotzdem er schon der geschlechtlichen Differenzierung innerhalb ein und derselben Spezies Einfluß auf den Unterkühlungsgrad zuschreibt[2]). Im Gegensatz dazu habe ich, wie oben bereits betont wurde, nirgends Angaben gemacht, die nicht auf eine große Anzahl von Versuchen (50 oder mehr bei demselben Objekt) begründet waren.

Da nach meinen Beobachtungen eine Gesetzmäßigkeit zwischen den besprochenen Größen nicht zu erkennen war, habe ich im weiteren Verlauf meine Versuche ohne Rücksicht auf die Abkühlungsgeschwindigkeit angestellt.

Einen weiteren viel umstrittenen Punkt bei dem Unterkühlungsphänomen bildet der Einfluß mechanischer Wirkungen, oder, was für unsere Zwecke bei Pflanzen nur in Betracht kommt, der Einfluß von Erschütterungen.

Schon Fahrenheit[3]), der Entdecker des Unterkühlungsphänomens, fand, daß stark unterkühltes Wasser durch Erschütterungen zum Erstarren gebracht wird, schwach unterkühltes dagegen nicht. Jaffé[4]) findet bei übersättigten Lösungen, daß sich verschiedene Stoffe teils indifferent gegen Erschütterung verhalten, teils eine Einwirkung erkennen lassen. Mez[5]) konnte bei Pflanzen konstatieren, daß, hauptsächlich innerhalb zweier von ihm näher charakterisierter Labilitätszonen, ausgeübte Stöße den Kristallisationsvorgang bei Unterkühlung einleiten. Die eine Zone liegt nahe dem Gefrierpunkte, die andere nahe dem tiefsten Unterkühlungspunkte. Da ich bei meinen Versuchen fand, daß durch Aufstoßen und Rütteln der benutzten Pflanzenteile die Erstarrung nach der Unterkühlung eingeleitet wird, also die Angaben von Mez bestätigt fand, wurde bei den unten zu besprechenden Versuchen, ob die Pflanze in der Unterkühlung getötet wird, sehr vorsichtig verfahren. Nach möglichst tief getriebener Unterkühlung wurde das Objekt mit der Thermonadel aus der Kältemischung unter sorgfältiger Vermeidung von Erschütterungen gezogen und mußte sich, ohne zu erstarren, auf Zimmertemperatur wieder erwärmen, um dann auf seinen Lebenszustand untersucht zu werden. Die dauernde Beobachtung der Galvanometerskala bei der Abkühlung wie bei der folgenden Erwärmung läßt mit absoluter Sicherheit erkennen, ob Kristallisation der Zellsäfte eintritt oder vermieden wird.

c) Diskussion der Fehlerquellen, welche in der Verwundung der Objekte ihre Ursache haben.

Bei allen an pflanzlichen und tierischen Objekten ausführbaren Untersuchungen über das Unterkühlungsphänomen wird man, sofern wirklich die Innentemperatur der betreffenden Objekte zur Beobachtung gelangen soll,

---

[1]) Bachmetjew, Entomolog. Studien I, p. 108, 107. [2]) Ders. I, p. 116.
[3]) Gabriel Fahrenheit in Phil. Trans. 39, p. 78 (1724).
[4]) Jaffé, l. c. p. 588. [5]) Mez, l. c. p. 99.

einen leider nicht unwesentlichen Versuchsfehler nicht vermeiden können. Keine derartige Untersuchung kann ausgeführt werden, ohne daß eine Verwundung des Objektes eintritt. Mit jeder Verwundung ist selbstverständlich ein Ausfließen des Zellsaftes aus dem Innern der verletzten Zellen verbunden. Jede Änderung der molekularen Struktur dieser ausgetretenen Zellsaftteile, insbesondere jedes Gefrieren derselben, pflanzt sich aber, wie seit langem bekannt ist[1]), allseitig außerordentlich rasch durch Zellmembranen und Gewebe fort. Man kann durch kein Mittel partielles Gefrieren und partielle Unterkühlung eines zusammenhängenden Organismus erzielen. Tritt irgendwo Kristallisation ein, so ergreift diese das Untersuchungsobjekt in seiner ganzen Ausdehnung. Von dieser Eigenschaft der Pflanzenteile wurde z. B. von Apelt[2]) in der Weise Vorteil gezogen, daß er durch Aufsetzen der zu untersuchenden Objekte auf eine dünne Eisschicht die bei seiner Fragestellung auszuschließende Unterkühlung mit Sicherheit vermied.

So muß es sich bei meinen Untersuchungen um die Frage handeln, ob ihre Resultate sich wesentlich auf den ausgetretenen Zellsaft, welcher die Thermonadel umgibt, beziehen, oder ob sie wirkliche Verhältnisse der normalen Zellgewebe darstellen.

Bezüglich der früheren Untersuchungen, welche insbesonders Müller-Thurgau[3]) mit Hilfe des Quecksilberthermometers, das in Pflanzenteile eingepreßt wurde, angestellt hat, kann mit großer Sicherheit behauptet werden, daß die gewonnenen Resultate sich wesentlich auf den ausgepreßten, das Gefäß des Thermometers umgebenden Zellsaft bezogen. In diesem Falle war die Masse der verletzten Gewebe eine so große und die mechanische Einführung des Instrumentes zugleich eine so wenig schonende, daß ohne allen Zweifel bedeutende ausgepreßte Zellsaftmengen das Gefäß des Thermometers umgaben, Mengen der Flüssigkeit, welche insbesondere ganz andere kapillare Spannungsverhältnisse aufweisen müssen als die Zellsäfte in den kleinen Zellräumen. Dazu kommt, was zuerst von Mez[4]) für Pflanzen nachgewiesen und jetzt von mir bestätigt wurde, daß der Luftgehalt der Flüssigkeit bezüglich der Tiefe der erreichbaren Unterkühlung der Objekte einen großen Einfluß hat. Über diesen Punkt wird unten zu handeln sein. Es leuchtet ein, daß bei der Einführung des Gefäßes eines Thermometers in lebende Gewebe nicht allein Zellsaft ausgepreßt wird, sondern daß dieser auch in nicht genau kontrollierbarer Weise mit Luft gemengt wird, daß dementsprechend eine in mehreren sehr wichtigen Beziehungen verschiedene und von dem Safte lebender Zellen streng zu unterscheidende Flüssigkeit bei Anwendung von Quecksilberthermometern zu Unterkühlungsversuchen vorliegt.

Anders steht es bei Verwendung der Thermonadel zu derartigen Versuchen. Je feiner und spitzer die Thermonadel ist, um so geringer sind die Verwundungen, die bei ihrem Einbringen gesetzt werden. Bei den von

---

[1]) Mez, l. c. p. 111. [2]) Apelt, l. c. p. 5.
[3]) Müller-Thurgau IX, p. 156. [4]) Mez, l. c. p. 104.

mir verwendeten außerordentlich spitzen und scharfen Instrumenten war nicht anzunehmen, daß beim Einstechen Quetschungen und dadurch Austritt größerer Zellsaftmengen aus der Zelle eintraten. Auch gibt die Kleinheit der durch die Thermonadel gesetzten Wunde nur sehr geringe Gelegenheit für Aufnahme von Luft durch den Zellsaft. Obgleich ich nicht verkenne, daß auch bei meinen Versuchen in der Meßmethode liegende Fehlerquellen vorhanden sind, halte ich dieselben für unbedeutend, unter allen Umständen für verschwindend klein gegenüber den bei allen bisher angewandten Meßmethoden entstehenden.

d) Einfluß des Luftgehaltes der Pflanzen auf das Unterkühlungsphänomen.

Daß Luftgehalt an sich der Unterkühlung von Flüssigkeiten hinderlich ist, scheint Dufour[1]) gewußt zu haben, denn er empfiehlt zur sicheren Erlangung von Unterkühlung bei Wasser Abkühlen luftfreien Wassers in luftverdünntem Raum. Füchtbauer[2]) verwendet zu seinen Unterkühlungsversuchen mit Wasser, wie er ausdrücklich angibt, ausgekochtes Wasser. Der erste, der bei Pflanzen die Einwirkung der gelösten Luft erkannte und auf die allgemeine Bedeutung dieses Umstandes für den Gefriervorgang der pflanzlichen Objekte hinwies, war jedenfalls Mez[3]). Er konstatierte den Einfluß des Luftgehaltes auf die Unterkühlung bei pflanzlichen Preßsäften und gab auf Grund seiner Beobachtungen und einer darüber aufgestellten Theorie eine weitere Erklärung für das erste Auftreten des Eises in den Interzellularen und Tracheen der Pflanzen. Meine Versuche bestätigen die Beobachtungen von Mez in bester Weise. Ich habe konstatieren können, daß mit wachsendem Interzellularquerschnitt die Unterkühlung abnimmt, ja vollständig unterbleibt.

Trägt man auf ein Achsenkreuz als Abszissen die Unterkühlungen in Skalenteilen, als Ordinaten die dazugehörigen Interzellularquerschnitte, die durch Aufzeichnen mit dem Abbeschen Zeichenapparat und nachheriges Ausmessen und Berechnen gewonnen wurden, letztere in hundertfacher Überhöhung auf, so erhält man eine für die tiefst erreichten Unterkühlungen bei abnehmendem Interzellularenquerschnitt ansteigende Kurve.

Unregelmäßigkeiten treten erst dann auf, wenn die Unterschiede zwischen den Interzellularquerschnitten gering werden, und andere Momente den Einfluß des Luftgehaltes der die Interzellularen auskleidenden Wasserhäutchen überwiegen. Meiner Meinung nach hat Mez[4]) recht, wenn er die Behauptung Müller-Thurgaus[5]), jede Pflanze müsse unterkühlt werden, bevor sie gefriere, bestreitet.

---

[1]) L. Dufour, Über das Gefrieren des Wassers und die Bildung des Hagels, in Poggendorfs Annalen, Bd. 114, p. 530 (1861).

[2]) Füchtbauer, l. c. p. 558. [3]) Mez, l. c. p. 103, 104.

[4]) Mez, l. c. p. 101. [5]) Müller-Thurgau, Landw. Jahrbücher IX, p. 145.

Tabelle IV.

Objekt	Unterkühlung		Interzellularenquerschnitt in qmm
	Skalenteile	Grad C.	
Strelitzia augusta . . .	—(22)	—0°	2,4
Nymphaea alba	— 39	—2,72°	1,68000
Veratrum Lobelianum . .	— 56	—3,91°	0,28000
Arum maculatum . . .	— 70	—4,89°	0,21600
Sagittaria sagittifolia . .	— 75	—5,24°	0,12600
Sempervivum tectorum. .	— 106	—9,81°	0,06300
Rhododendron canadensis .	— 102	—9,44°	0,03068
Megasia ciliata*) . . .	— 76	—7,03°	0,02090
Papaver pinnatifidum . .	— 108	—10,00°	0,010540
Rumex obtusifolius . . .	— 117	—10,80°	0,006450
Helleborus hybridus . .	— 138	—12,79°	0,006350
Yucca filamentosa*) . .	— 89	—8,24°	0,004140
Hedera Helix.	— 122	—11,29°	0,003020
Verbascum phlomoides. .	— 139	—12,87°	0,001790
Lactuca virosa	— 120	—11,11°	0,000066
Ricinus communis . . .	— 122	—11,29°	0,000025

*) Fallen durch überaus luftreiches Gewebe infolge vieler kleiner Interzellularen aus der Reihe.

Für die Tracheen vermochte ich einen experimentellen Nachweis, daß ihre Größe die Unterkühlung mindere, nicht zu erbringen. Doch sprechen für diese Annahme die anatomischen Beobachtungen, welche zuerst Müller-Thurgau[1]) gemacht hat. Auch ist keinerlei Grund vorhanden, weswegen mit Luft erfüllte Tracheen sich anders verhalten sollen als Luft führende Interzellularen. Bei beiden Organgruppen grenzen Luftsäulen an mit Wasser imbibierte Membranen; die Dicke dieser Membranen kann auf das allein in Betracht kommende mit der Luft in Berührung stehende Flüssigkeitshäutchen keinen Einfluß ausüben.

e) Einfluß der kapillaren Spannung des Zellsaftes auf die Unterkühlung.

Von weiteren für die Theorie der Unterkühlung in Pflanzen in Betracht kommenden Eigenschaften der Zellgewebe seien zunächst die Oberflächenspannungen untersucht, denen wohl hauptsächlich die Unterkühlung in den kapillaren Zellräumen der Pflanze zugeschrieben werden muß.

Der die Unterkühlung fördernde Einfluß der Kapillaren ist vielfach beobachtet und in verschiedenster Weise bestätigt. So von Mousson[2]), Bach-

[1]) Müller-Thurgau, Landw. Jahrbücher XV, p. 456, 481; vgl. auch Mez, l. c. p. 103.

[2]) Mousson, Physik auf Grundlage der Erfahrung. 1. Aufl., II. Abteil., p. 73.

metjew[1]) (Tonkugeln), Müller-Thurgau[2]) (Fließpapier), Frankenheim[3]) (kleine Massen); Jaffé[4]) und Füchtbauer[5]), welche das Unterkühlungsphänomen von übersättigten Lösungen resp. reinen Stoffen studiert haben, verwendeten fast ausschließlich Kapillaren. Auch Müller-Thurgau, der das Unterkühlungsphänomen an Pflanzen zuerst beobachtete, schreibt dem anatomischen Aufbau des Gewebes vor allen anderen Ursachen das Auftreten der Unterkühlung zu. Für ihn fördern alle Bedingungen, welche die Beweglichkeit der Wasserteilchen hindern und den Gefrierpunkt erniedrigen, eine Unterkühlung[6]). Was den ersten Teil dieses Satzes betrifft, wird man Müller-Thurgau beistimmen, der zweite aber ist, wie oben (p. 8) von mir gezeigt wurde, unrichtig. Besonders betont ferner Molisch[7]) den Kapillaritätseinfluß bei der Unterkühlung und mißt ihr in biologischer Beziehung eine große Bedeutung zu. Dies alles ließ den Gedanken gerechtfertigt erscheinen, daß zwischen Zellgröße und Unterkühlung eine experimentell auffindbare Beziehung bestände. Die von mir vorgenommene genaue Untersuchung dieser Verhältnisse ergab aber ein von diesen theoretischen Erwägungen abweichendes Resultat.

Tabelle V.

	Objekt	Unterkühlung		Zellgröße in cbmm
		Skalenteile	Grad C.	
1	Rhododendron canadense .	— 102	— 9,44°	0,0000691
2	Hedera Helix	— 122	— 11,29°	0,000153
3	Yucca filamentosa . . .	— 89	— 8,24°	0,000217
4	Ricinus communis . . .	— 122	— 11,29°	0,000260
5	Megasia ciliata	— 76	— 7,03°	0,000513
6	Rumex obtusifolius . . .	— 117	— 10,80°	0,00127
7	Helleborus hybridus . .	— 138	— 12,79°	0,00263
8	Sempervivum tectorum. .	— 106	— 9,81°	0,00269
9	Papaver pinnatifidum . .	— 108	— 10,00°	0,00287
10	Verbascum phlomoides. .	— 139	— 12,87°	0,00309
11	Lactuca virosa	— 120	— 11,11°	0,00447

Aus dieser Tabelle ist kein die Theorie bestätigender Schluß zu ziehen. *Rhododendron* weist eine tiefste erreichbare Unterkühlung von — 102 Skalenteilen auf, *Papaver pinnatifidum,* dessen Zellen vierzigmal größer sind, eine solche von — 108 Skalenteilen. Einen maßgebenden Einfluß auf die Tiefe der Unterkühlung hat die Zellgröße also nicht.

---

[1]) Bachmetjew in Zeitschrift für wissensch. Zoologie, Bd. 66, p. 584 (1899).
[2]) H. Müller-Thurgau, Landw. Jahrbücher IX, p. 146.
[3]) W. Ostwald, l. c. p. 752. [4]) Jaffé, l. c. p. 567.
[5]) Füchtbauer, l. c. p. 558.
[6]) Müller-Thurgau in Landw. Jahrbüchern IX, p. 185.
[7]) Molisch, l. c. p. 19.

Merkwürdigerweise hält es Bachmetjew[1]) in den Ergebnissen seiner Arbeit für sehr wahrscheinlich, daß sich bei Schmetterlingspuppen ein einfaches Verhältnis zwischen der Größe des Tieres und dem Unterkühlungsgrad auffinden lasse, derart, daß, je größer die Puppe, um so geringer der minimale Unterkühlungsgrad sei. Davon kann gar nicht die Rede sein. Das würde doch, in die Botanik übersetzt, heißen, daß eine zweijährige Eiche weniger tief unterkühlt werden kann als eine einjährige Eiche. So einfach liegen die Verhältnisse denn doch nicht. Bachmetjews Resultate leiden, wie bereits oben (p. 12) gezeigt wurde, an dem Fehler, daß sie auf eine viel zu geringe Zahl von Beobachtungen begründet wurden.

Alle oben angeführten Autoren sehen den Einfluß kapillarer Räume auf zu unterkühlende Flüssigkeiten in den durch Oberflächenspannungen verursachten Zustandsänderungen der Stoffe, analog dem Einflusse dieser auf die Gefrierpunktserniedrigung, also dem Druck. Da aber schon Müller-Thurgau[2]) unentschieden lassen mußte, ob der osmotische Druck in den Zellen die Unterkühlung wirklich beeinflußt, war es von Interesse, die Frage genauer zu untersuchen.

f) Wirkung des osmotischen Druckes auf die Unterkühlungsgröße.

Da die Konzentration einer Flüssigkeit an und für sich, wie oben schon gesagt, einen Einfluß auf den Unterkühlungsgrad nicht auszuüben vermag, kam hier der Druck, unter dem die Pflanzen infolge der osmotisch wirksamen Stoffe innerhalb des Plasmaschlauches stehen, in Frage.

Die Versuche wurden unter gleichen Vorsichtsmaßregeln ausgeführt, wie die über die Wirkung der Abkühlungsgeschwindigkeit angestellten und alle übrigen Unterkühlungsexperimente. Mit jedem Objekt wurden die Versuche dreimal zu verschiedenen Zeiten jeweils mindestens fünfzigmal durchgeführt, sodaß sich bezüglich der Unterkühlungstiefe ziemlich sichere Resultate ergeben haben dürften. Dafür spricht auch bei den Objekten, die bei anderer Gelegenheit schon einmal untersucht waren, die gute Übereinstimmung der erreichten tiefsten Unterkühlungspunkte. Der osmotische Druck wurde mittels KNO_3-Lösungen bestimmt, deren Prozentgehalt sich in Differenzen von 0,2% KNO_3 innerhalb des Konzentrationsgebietes von 1%—5% KNO_3 abstufte.

Nach zahlreichen Versuchen mit einer sehr großen Anzahl von Objekten — es wurden unter anderen eine ganze Reihe Crassulaceen untersucht, bei denen der Turgor infolge der eigenartigen Atmungsverhältnisse besonders großen Schwankungen[3]) unterliegt — muß ein merkbarer Einfluß des

[1]) Bachmetjew in Zeitschrift für wissensch. Zoologie, Bd. 67, p. 550 (1900).

[2]) H. Müller-Thurgau in Landwirtsch. Jahrbüchern IX, p. 185.

[3]) G. Kraus, Stoffwechsel der Crassulaceen (Abhandlg. der Naturforschenden Gesellschaft zu Halle, Bd. 16, 1886), p. 7, fand bei *Bryophyllum* den Unterschied im Gehalt an freier Äpfelsäure am Tage und während der Nacht bis 6,2% der Trockensubstanz.

osmotischen Druckes auf die Unterkühlung bei Pflanzen verneint werden. In der beigegebenen Tabelle ist von jedem Objekt nur die tiefste erreichte Unterkühlung angegeben.

Tabelle VI.

	Objekt	Unterkühlung	Anstieg auf	Unterk.-Grad	Turgor isoton % KNO_3
1	Aconium Humboldti . . .	—13,29°	—2,33°	10,96	1,0
2	Sedum oppositifolium . . .	—13,59°	—4,74°	8,85	1,6
3	Sedum purpurascens . . .	—12,09°	—1,67°	10,42	1,8
4	Sedum spectabile	—12,18°	—2,51°	9,67	1,8
5	Impatiens Sultani	—12,74°	—4,37°	8,37	2,0
6	Sedum roseum	—13,02°	—1,95°	11,07	2,0
7	Saxifraga cordifolia . . .	—10,88°	—6,51°	4,38	2,4
8	Cacalia repens	—12,56°	—5,67°	6,89	2,6
9	Sempervivum Zelebori . . .	—13,49°	—5,67°	7,82	2,8
10	Sempervivum soboliferum . .	—14,88°	—6,14°	8,74	3,0
11	Rumex obtusifolius	—10,23°	—3,72°	6,51	3,0
12	Sempervivum ruthenicum . .	—14,79°	—4,28°	10,51	3,4
13	Sempervivum Reginae Amaliae	—13,29°	—4,93°	8,36	3,6
14	Sempervivum elegans . . .	—16,00°	—6,76°	9,24	3,8
15	Sempervivum fimbriatum . .	—16,18°	—5,23°	10,95	3,8
16	Yucca filamentosa	—7,91°	—3,72°	4,19	4,0
17	Verbascum phlomoides . .	—12,18°	—5,77°	6,41	4,0
18	Saxifraga elatior	—3,91°	—	—	4,2
19	Dipsacus fullonum	—13,02°	—5,67°	7,35	4,4
20	Helleborus hybridus . . .	—12,56°	—6,42°	6,14	4,6

g) Unterkühlungshemmende Wirkung von Pflanzenschleim.

Als letzte innere Ursache, welche bei der allgemeinen Besprechung der Abhängigkeit der Unterkühlung in Pflanzen in Betracht kommen kann, ist die Wirkung vorhandener schleim- und gummiartiger Stoffe, auf deren unterkühlungsmindernden Einfluß Mez[1]) aufmerksam gemacht hat, zu nennen. Während bei den in den bisherigen Tabellen aufgeführten Pflanzen kein wesentlicher Gehalt von Pflanzenschleim in den Geweben vorhanden ist, wurden nun zur Prüfung der Wirkung des Schleims einige reichlich mit Mucin versehene Arten, besonders Malvaceen, herangezogen. Die Versuche bestätigten im vollsten Maße die Beobachtungen von Mez.

So konnte bei *Althaea officinalis* trotz vieler Versuche nur einmal Unterkühlung bis —4,19° C. bei dem sehr geringen Unterkühlungsgrade (Differenz zwischen Gefrier- und Unterkühlungspunkt) 1,19° erhalten werden, während *Althaea rosea* bisweilen, aber sehr geringe Unterkühlung bis —3,85° (Unterkühlungsgrad 0,91° C.) zeigte. Ein Einfluß von Interzellularen ist hier voll-

[1]) Mez, l. c. p. 104.

Tabelle VII.

Objekt	Lfd. Nummer der Versuche	Unterkühlung Grade C.	Anstieg bis Grade C.	Unterkühlungsgrad Skt.	Unterkühlungsgrad Grade C.
Althaea officinalis	1—19	keine Unterkühlung			
	20	—4,19	—3,00	17	1,19
Althaea rosea	1—13	keine Unterkühlung			
	14	—2,09	—1,95	2	0,14
	15	—2,09	—2,02	1	0,07
	16	—2,31	—2,17	2	0,13
	17	—2,31	—2,17	2	0,14
	18	—2,79	—2,09	10	0,70
	19	—3,00	—1,95	15	1,05
	20	—3,49	—2,09	20	1,40
	21	—3,85	—2,94	13	0,91
Malva silvestris	1—11	keine Unterkühlung			
	12	—2,09	—2,02	1	0,07
	13	—2,72	—2,37	5	0,35
	14	—3,85	—3,28	9	0,57
	15	—5,03	—3,70	19	1,33
Symphytum officinale	1—9	keine Unterkühlung			
	10	—2,17	—1,95	3	0,22
	11	—3,00	—2,09	13	0,91
	12	—3,35	—2,79	8	0,56
	13	—3,54	—2,85	24	0,69
	14	—6,29	—2,65	52	3,64
	15	—6,36	—2,51	55	3,85

ständig ausgeschlossen. Dieses Resultat, daß tatsächlich pflanzliche Mucinstoffe die Unterkühlung hindern resp. mindern, steht in guter Übereinstimmung mit der Behauptung Müller-Thurgaus[1]), daß alle diejenigen Bedingungen die Unterkühlung mindern, welche die Beweglichkeit der Flüssigkeitsmolekeln hemmen. Ebenso wird durch unser Ergebnis die Anschauung Füchtbauers[2]) gestützt, daß die von ihm als unterkühlungshemmend anerkannten wirksamen Staubteilchen colloidaler Natur seien. Man wird die Viskosität der im Pflanzenkörper vorhandenen Kolloide bezüglich des Unterkühlungsphänomens nicht außer acht lassen dürfen.

[1]) Müller-Thurgau in Landw. Jahrbüchern IX, p. 185 (1880).
[2]) Füchtbauer, l. c. p. 554.

B. Die biologische Bedeutung des Unterkühlungsphänomens.

I. Untersuchungen über die Frage, ob der Kältetod in der Unterkühlung eintritt?

Der Unterkühlung wird von Müller-Thurgau[1]) und Molisch[2]) für den Schutz des Lebens bei eintretender Abkühlung der Pflanze eine beträchtliche Wichtigkeit zugeschrieben. Da beide Autoren vor allem in dem durch die Eisbildung bedingten Wasserentzug die Todesursache sehen, war es natürlich, daß sie das vielfach sich zeigende Unterkühlungsphänomen als Schutzmittel für die Lebensvorgänge in der Pflanze in Anspruch nahmen und daher allen Pflanzen insgemein zuschrieben, da ja dadurch die Eisbildung, und damit die den Tod bedingende Ursache, hinausgeschoben wird. Im Gegensatz dazu ist Mez[3]) der Ansicht, daß nicht eintretende Unterkühlung den Pflanzen von Nutzen sei.

Eine Ausdehnung der experimentellen Untersuchungen auf diesem Gebiete war wünschenswert. Insbesondere ließ auch das Studium des Unterkühlungsphänomens weitere Beiträge zur theoretischen Auffassung des Kältetodes erwarten.

Die Frage, ob die Pflanze bei sehr tiefer Abkühlung in der Unterkühlung überhaupt stirbt, ist von früheren Autoren nicht berührt und noch vollständig ungeklärt. Nur Mez[4]) hat beobachtet, daß sehr niedrige Temperaturen selbst bei Tropenpflanzen (Mez arbeitete mit *Peperomia incana*) manchmal nicht zum Tode führen.

Im Verlauf seiner Untersuchungen über das Erfrieren von Gewächsen verschiedener Klimate war Rein[5]) auf die Tatsache gestoßen, daß die gesamten Angaben früherer Autoren[6]) über Erfrieren von Gewächsen über 0^0 sich nicht auf den eigentlichen Erfriertod bezogen, sondern daß der Tod als Folge einer durch die Kälte verursachten Krankheit angesehen werden müsse. Kein Gewächs erfriert über -2^0, selbst die empfindlichsten Tropenpflanzen (z. B. Gesneraceen) nicht. Die Beobachtung Apelts[7]) dagegen, daß eine einmalige tiefe Abkühlung des Versuchsobjektes unter das spezifische Minimum nicht durch eine länger anhaltende Temperatur wenig über dem Gefrierpunkt ersetzt werden könne, bezieht sich nicht auf unterkühlte, sondern auf ohne Unterkühlung gefrorene Objekte.

---

[1]) Müller-Thurgau in Landw. Jahrbüchern IX, p. 145.

[2]) Molisch, l. c. p. 19.

[3]) Mez, l. c. p. 105.

[4]) Mez, l. c. p. 97 erwähnt, vgl. p. 111.

[5]) Rein, l. c. p. 8.

[6]) Goeppert, Über Wärmeentwicklung in den Pflanzen, p. 43 (Breslau 1830); Kunisch, Über die tötliche Einwirkung niederer Temperatur auf die Pflanze, p. 14 (Breslau, Inaug.-Diss., 1880); Molisch, l. c. p. 49 ff.; A. Bjerkander in Kgl. schwedisch. akademisch. Abhandlungen f. d. Jahr 1778, Bd. 40, p. 55—58; Hardig, Bot. Zeitung, 1854, p. 202.

[7]) Apelt, l. c. p. 41.

Da ferner von Rein[1]) beobachtet ist, daß die eutektischen Punkte der Zellsäfte aller untersuchten Pflanzen der bezeichneten empfindlichen Tropenkonstitution sehr hoch, nämlich Bruchteile von Graden über dem Erfrierpunkt liegen, so folgt daraus, daß bei diesen Tropenpflanzen der Eintritt der Eisbildung für das Erfrieren nicht gleichgültig ist. Denn das Eintreten der Eisbildung ist das einzige faßbare Moment, welches bei der Temperatur wenig unter 0° zu den sonst gleichmäßigen Innenumständen dazu kommt und hier einen Anknüpfungspunkt für eine Erklärung bietet.

Tatsächlich hat die Eisbildung einen höchst wesentlichen Einfluß. Um ihn zu studieren, wurde das Unterkühlungsphänomen herangezogen. Es war die Frage zu beantworten: welchen Einfluß hat die Unterkühlung auf die Pflanze, wenn nachfolgende Eisbildung vermieden wird?

Die Untersuchungen wurden in der Weise angestellt, daß bei Beginn der Experimente vorerst durch eine große Anzahl von Versuchen der Todespunkt der betreffenden Pflanze genau festgelegt wurde. War dieses geschehen, so wurden Stücke von dem Objekte an der Nadel unterkühlt. Um hierbei zu recht tiefen Temperaturen zu gelangen, wurde vor jedem Versuch genau in der oben angegebenen Weise die Nadel sorgfältig von etwa vorhandenen Eisbildungen gereinigt, außerdem das Schutzglas, in welchem Thermonadel und Objekt schwebten, mit absolutem Alkohol von dem Eistau, der sich an der inneren Gefäßwandung niedergeschlagen hatte, durch Ausspülen gereinigt, sodaß die sonst allzu häufige hemmende Wirkung von Kristallkeimen selbst dann, wenn das Objekt einmal zufällig das Umhüllungsglas berührte (was zwar möglichst sorgfältig vermieden wurde, aber beim Einschieben doch manchmal vorkam) auf ein sehr geringes Maß beschränkt wurde. Nach möglichst tief getriebener Unterkühlung wurde die Thermonadel vorsichtig, um Erschütterungen zu vermeiden, mit dem Objekt aus der Kältemischung gezogen und über der kalten Luft des Abkühlungsgemisches langsam wieder auf Zimmertemperatur gebracht, ohne daß Gefrieren eintrat. Dann wurde mittels Plasmolyse konstatiert, ob das Objekt getötet war oder lebte.

Es ist mir, und dies Resultat ist von großer Wichtigkeit, nie gelungen, den Kältetod zu konstatieren. Wie die folgende Tabelle zeigt, wurde bei sehr vielen Objekten die Unterkühlung tief unter den Todespunkt herabgetrieben; bei keinem derselben trat der Tod ein, wenn Eisbildung vermieden wurde (siehe umstehende Tabelle VIII).

Über Schädigungen des Protoplasten, welche bei Unterkühlung bis zu tiefen Temperaturen auftreten, wird unten gehandelt werden. Die unterkühlten Stücke — es wurden hierbei Unterkühlungen von — 13° C. erreicht — plasmolysierten in gleicher Weise wie die Kontrollobjekte.

Um den Kältetod herbeizuführen, muß also neben der Temperaturerniedrigung auch die Eisbildung in den Geweben vorhanden sein. Mit

[1]) Rein, l. c. p. 25.

Tabelle VIII.

Objekt	Todespunkt	Unterkühlung Skalenteile	° C. unter 0	Zustand	Unterkühlung Skalenteile	° C. unter 0	Zustand
							$1^0 = 13{,}5$ Skt.
		— 50	3,70	lebend	— 114	8,44	lebend
		— 73	5,40	lebend	— 133,5	9,88	lebend
Agave americana	— 74 Skt.	— 85	6,29	lebend	— 139	10,30	lebend
	oder	— 95,5	7,14	lebend	— 142	10,52	lebend
	— 5,5 ° C.	— 110	8,22	lebend	— 147	10,88	lebend
		— 113	8,37	lebend	— 155,5	11,52	lebend
					— 169,5	12,55	lebend
Escheveria Leopoldiana	— 46 Skt.	— 90	6,66	lebend	— 156	11,55	lebend
	oder	— 115	8,51	lebend	— 141	10,44	lebend
	— 3,4 ° C.	— 123	9,11	lebend	— 151	11,19	lebend
							$1^0 = 10{,}8$ Skt.
Tradescantia virginica	— 56 Skt.	— 94	6,96	lebend	— 103,5	7,66	lebend
	oder	— 95,5	7,14	lebend	— 100	7,40	lebend
	— 5,2 ° C.	— 94	6,96	lebend	— 106	7,85	lebend
							$1^0 = 13{,}5$ Skt.
Ricinus communis	— 72 Skt.	— 60	4,44	lebend	— 111	8,22	lebend
	oder	— 94	6,96	lebend	— 103	7,65	lebend
	— 5,5 ° C.	— 100	7,40	lebend	— 120	8,88	lebend
							$1^0 = 13{,}2$ Skt.
Tropaeoleum majus	— 53 Skt.	— 89	6,58	lebend	— 130	9,63	lebend
	oder	— 103	7,65	lebend	— 142	10,52	lebend
	— 4,0 ° C.	— 121	8,96	lebend	— 156	11,55	lebend

diesen Resultaten wird eine Frage von großer theoretischer Wichtigkeit angeschnitten. Die mit theoretischen Gründen und auf experimentelle Weise reichlich widerlegte physikalische Erfrierhypothese, daß der Tod des Protoplasmas durch Wasserentzug eintritt, scheint eine neue gewichtige Bestätigung zu erhalten. Denn es wird durch diese Untersuchungen gezeigt, daß nicht die inframinimale Temperatur für sich allein tötend wirkt.

II. Untersuchungen über die thermischen Verhältnisse am Todespunkt erfrierender Pflanzen.

Klarheit bezüglich der physikalischen, auf Austrocknung der Protoplasten basierten Erfriertheorie konnten nur Untersuchungen ergeben, die noch viel feiner, als dies bisher geschehen war, die thermischen Verhältnisse am Todespunkt verschiedener Pflanzen klarlegten.

Es handelt sich um folgende Erwägungen: Wenn durch den Gefriervorgang irgend ein Teil des Protoplasten eine molekulare Veränderung erleidet (Apelt[1]) hat bereits wahrscheinlich gemacht, daß der Kältetod auf einem Zerfall des Protoplasmas beruhe), ist die Möglichkeit, ja die Wahr-

[1]) Apelt, l. c. p. 47.

scheinlichkeit vorhanden, daß bei ganz feiner Messung irgend welche thermischen Vorgänge bei diesem Zerfall zu beobachten sind.

Die zweite Möglichkeit der Lokalisation des Kältetodes an seiner spezifischen Stelle ist, daß dort irgend welche besonderen Abschnitte im Gefriervorgang liegen könnten, z. B. daß das eutektische Gemisch irgend einer zusammengesetzten Salzlösung an der betreffenden Stelle gefriert. Auch dieser Vorgang muß sich (und das noch viel deutlicher als ein etwaiger Protoplasmazerfall) durch thermische Veränderungen am Todespunkt markieren.

Endlich tauchte die Hypothese auf[1]), daß der Kältetod durch Aussalzen von löslichen Eiweißkörpern infolge der durch das Gefrieren des Wassers entstehenden Konzentration der Salzlösung eintritt. Die Möglichkeit lag vor, daß auch dieser Vorgang sich beim Todespunkt in der Temperaturkurve bemerkbar mache.

Untersuchungen, welche in dieser Richtung angestellt werden, können nun nicht mit Größen von 1/10° C. rechnen. Dieser Maßstab wäre viel zu grob. Daher konnte die bisherige Meßmethode, bei der 10,8 Skalenteile = 1° oder 1 Skalenteil = 0,0926° C. entsprachen, unmöglich ausreichend erscheinen.

Durch Ausschaltung des inneren Widerstandes des von mir benutzten Galvanometers sind 1/100° direkt meßbar, 1/1000° mit Sicherheit schätzbar. Nur eine Messung mit so kleinen Größen konnte einige Aussicht auf Erfolg bieten. Zur besseren Kontrolle wurde noch eine Versuchsanordnung benutzt, bei der durch Einschalten eines äußeren Widerstandes in Nebenschluß erreicht wurde, daß die Empfindlichkeit der feinsten Einstellung (1° = 100 Skt.) auf 1° = 50 Skalenteile herabgemindert wurde. So standen mir drei verschiedene Einstellungen zur Verfügung:

I. 1 Skalenteil = 0,0926° C. (1° = 10,8 Skalenteile),
II. 1 Skalenteil = 0,0202° C. (1° = 50 Skalenteile),
III. 1 Skalenteil = 0,0102° C. (1° = 100 Skalenteile).

Die Anstellung dieser Messungen war aber mit großen technischen Schwierigkeiten verknüpft. Da man bei Messungen mit dem Galvanometer an Ausschläge von einer bestimmten Amplitude gebunden ist, war es bei Einstellung II und III nicht möglich, solange die Kühlstelle zur Vermeidung der Peltierschen Wirkung bei 0° gehalten wurde, Temperaturen unter —4° resp. unter —2° zu messen. Objekte mit so hohem Erfrierpunkt (besonders bei Einstellung III) in genügender Anzahl und Verschiedenartigkeit zu finden, war nicht leicht und ihre ausschließliche Untersuchung nicht angängig. Um also in der Wahl der Objekte nicht zu beschränkt zu sein und dennoch die Messungen mit den feinen Methoden vornehmen zu können, mußte eine Möglichkeit gefunden werden, nach Bestimmung des Todespunktes durch die grobe Einstellung (I) und mit Kühlstelle bei 0,0°, die Kühlstelle

[1]) Gorke, Über chemische Vorgänge beim Erfrieren der Pflanzen. Landw. Versuchsstationen, Bd. 65, p. 149 (1907).

ganz in der Nähe des Todespunktes konstant zu halten, um in einer Amplitude von nur wenigen Graden die thermischen Vorgänge genau kontrollieren und die Temperaturkurve des Pflanzenteiles in diesem Wärmegebiet aufnehmen zu können.

Dieses Mittel fand sich in der bei Kältemischungen zutagetretenden Erscheinung des kryohydratischen Punktes[1]). Gibt man nämlich zu einer Kältemischung nach und nach mehr Salz, so gelangt man schließlich zu einem Punkte, wo die flüssige Phase, d. h. die durch Schmelzen des Eises entstandene konzentrierte Salzlösung, im Gleichgewicht ist mit den festen Phasen Salz und Eis, also zu einer Temperatur, wo die flüssige Phase bei Wärmeentzug sowohl Eis wie Salz ausscheiden und umgekehrt bei Wärmezufuhr die festen Phasen Salz und Eis auflösen würde. Derartige Umwandlungspunkte sind, wie wir vom Eise und vom Vorhandensein eines bestimmten Schmelzpunktes bei festen Körpern wissen, mit einer konstanten Temperatur verknüpft. Es ist der Erstarrungspunkt der konzentrierten Salzlösung. Diese kryohydratische Temperatur hat für jedes Salz einen spezifischen Wert[2]), und zwar haben leichtlösliche Salze und solche, die den Gefrierpunkt stärker erniedrigen, im allgemeinen eine tiefere kryohydratische Temperatur als schwerlösliche[3]). So ist man also in der Lage, die Kühlstelle in der Nähe jedes Todespunktes, wo er auch liegen möge, konstant zu halten, sofern man nur ein Salz mit der betreffenden kryohydratischen Temperatur in Anwendung bringt.

Bei der praktischen Ausführung mußte ich also dafür sorgen, daß in der Kältemischung immer das betreffende Salz in festem Aggregatzustande zugegen war; es durfte allerdings nicht in derartigen Mengen zugebracht werden, daß seine Eigenwärme die Temperatur der Kältemischung beeinflussen konnte.

Mit diesem Mittel und unter Benutzung starker Wärme-Isolation war es mir möglich, die Temperaturen solcher Kältegemische bisweilen eine Stunde lang auf zehntel Grade genau konstant zu halten.

Die Kühlstelle wurde in dieses Gemisch getaucht, und nach Erreichung der konstanten Temperatur konnten die Versuche beginnen. Unmittelbar in der Nähe der Kühlstelle tauchte in das Gefäß, welches die Kühlstelle mit Petroleum umgab, ein Thermometer, von dem jederzeit und vor jedem Versuch die Temperatur der Kühlstelle abgelesen und so kontrolliert werden konnte, bei welchem Kältegrade der Nullpunkt des Galvanometers lag. Vor und nach jedem Versuch wurde die Temperatur der Kühlstelle notiert und bei Berechnung des Todespunktes verwendet. Da ein Versuch die Dauer von 5′ nie überschritt, genügte diese Vorsichtsmaßregel, um gröbere Versuchs-

---

[1]) W. Nernst, Theoretische Chemie, p. 128; Winkelmann, Handbuch der Physik, Bd. II, p. 628.

[2]) W. Nernst, l. c. p. 128.

[3]) W. Nernst, l. c. p. 128; Winkelmann, l. c. p. 630.

fehler fernzuhalten. Daß die Kältemischung jederzeit fleißig umgerührt wurde, insbesondere vor jedem Versuch, sei besonders betont. Die Temperaturkurve des zu untersuchenden Pflanzenteils wurde durch Ablesungen der Zeit bei Einstellung I von 10 zu 10 Skalenteilen, bei Einstellung II von 20 zu 20 Skalenteilen, bei Einstellung III von 40 zu 40 Skalenteilen festgestellt. Zur näheren Erläuterung sei ein Versuchsbeispiel hier angeführt. War z. B. der Todespunkt von *Tradescantia virginica* mit grober Methode (1 Skalenteil = 0,0926° C.) bei —5,5° C. festgestellt worden und es sollten die thermischen Vorgänge in der Nähe des Todespunktes mit der empfindlicheren Meßmethode II (1 Skalenteil = 0,0202° C.) weiter untersucht werden, so wurde die Kühlstelle durch eine Kältemischung von Zinksulfat und Eis, deren kryohydratischer Punkt bei —6,5° C. liegt[1]), auf dieser Temperatur, dem Todespunkte der Pflanze sehr nahe, konstant gehalten. Dann wurde das Objekt an die Thermonadel gespießt und der Gefriervorgang eingeleitet. Dies geschah unter Vermeidung von Unterkühlung durch Auflegen eines Eissplitterchens, welches, wie durch eine sehr große Anzahl von Vorversuchen festgestellt war, regelmäßig jede Unterkühlung verhindert. War die Temperatur des Objektes soweit gesunken, daß die Gefrierkurve mit dem Galvanometer verfolgt werden konnte, so wurde die Temperatur der Kühlstelle schnell abgelesen, sie lag bei —6,4° C., der Nullpunkt ist also bei —6,4° anzusetzen. Der Todespunkt der Pflanze ist bei —5,5° C. Die Differenz zwischen beiden beträgt 6,4°—5,5° = 0,9°. Der Todespunkt mußte sich also, falls thermische Vorgänge eintreten sollten, bei 0,9 . 50 = 45 Skalenteilen markieren, und zwar bei Skalenteil +45 der Galvanometerskala, da der Nullpunkt tiefer liegt als der Todespunkt. Die aufgenommenen Temperaturkurven zeigten aber weder bei dem angegebenen, als Beispiel herangezogenen Objekt, noch, wie meine folgenden Tabellen ausweisen, bei irgend einer anderen untersuchten Pflanze bei dieser Temperatur in einem Spielraum von 2,6° eine Unregelmäßigkeit, also kann von einer Veränderung, die mit thermischen Vorgängen verbunden ist, nicht die Rede sein. In gleicher Weise sind die in der Tabelle aufgeführten Temperaturkurven gewonnen.

Aus den im Anhang abgedruckten Tabellen IX—XV ergibt sich, daß bei Einstellung II und III nirgends in der Nähe des Todespunktes eine Knickung der Temperaturkurve zu bemerken ist. Beim Todespunkt kann also von den oben angeführten drei möglichen Veränderungen im Protoplasma, soweit solche mit thermischen Vorgängen verbunden sind, nicht die Rede sein.

Es ist danach jedenfalls ausgeschlossen, daß der Tod mit dem Kristallisationsvorgang irgend etwas direkt zu tun hat, ferner ist es höchst wahrscheinlich, daß der Gefriervorgang nichts mit dem Zerfall des Protoplasmas zu tun hat, während die Aussalzung von Eiweißstoffen selbst bei so feinen Messungen nicht ausgeschlossen ist, da es sich dabei um kleine Mengen

[1]) Landolt-Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen.

handeln kann und die Molekularstruktur dieser Körper völlig unklar ist. Wir haben deshalb keinerlei Anhalt, auch nur Vermutungen anzustellen, welche Größe die thermischen Vorgänge beim Aussalzen gelöster Eiweißkörper haben könnten.

Diese Untersuchungen der thermischen Vorgänge am Todespunkt selbst würden aber dafür, daß am Todespunkt keinerlei mit Wärmeentwicklung verbundene Prozesse stattfinden, noch nicht völlig beweisend sein, wenn bei weiterem Verfolgen der Temperaturkurve nach unten, in derselben irgend welche Knickung anzeigte, daß noch Gefriervorgänge in den Zellen unterhalb des Todespunktes stattfänden. Es war dementsprechend die Temperaturkurve noch weiter zu verfolgen bis zu einer Temperatur herunter, bei welcher mit Sicherheit anzunehmen ist, daß keine Lösung der in der Pflanze zu erwartenden Salze noch flüssig ist. Beistehende Tabelle gibt die kryohydratischen Punkte der Salze, welche hier in Betracht kommen können.

Tabelle XVI.

Salz	Kryohydratischer Punkt bei	Anzahl gr in 100 g Wasser löslich bei nebenstehender Temperatur
Oxalsäure . . .	—0,5°	5,2
Natriumkarbonat .	—2,1°	6,2
Kaliumnitrat . .	—2,9°	12,2
Rohrzucker . .	—8,5°	51,4
Kaliumchlorid . .	—11,1°	24,6
Natriumchlorid .	—22,4°	30,9
Natriumnitrat . .	—18,5°	58,5
Ammoniumnitrat .	—17,35°	70,0
Kaliumkarbonat .	—36,5°	66,5

Die niedrige Temperatur wurde durch feste Kohlensäure nach der von Rein[1]) angegebenen Methode erreicht und mit Benutzung des inneren Widerstandes des Galvanometers (1/10° meßbar, 1/100° schätzbar) gemessen, sodaß die Meßmethode ausreichend war, um eventuell auftretende Knickungen der abfallenden Temperaturkurve aufzufinden. Vorgesehen war, derartige Knickungen dann in feiner Weise noch weiter zu untersuchen. Das Resultat vieler sehr schwieriger Aufnahmen war, daß keinerlei Knickung der Abfallskurve beobachtet werden konnte (vgl. Tabelle XVII im Anhang).

Daraus geht hervor, daß die Abfalllinien in ihrem Verlauf allein durch den Temperaturabfall des Objektes und nicht durch damit in Konkurrenz tretende Wärmequellen bedingt sind, mit anderen Worten, daß der Kristallisationsvorgang der festwerdenden Säfte nicht nur beim Todespunkt, sondern über dem Todespunkt bereits vollständig eingetreten ist.

---

[1]) Rein, l. c. p. 7.

So wird man aus der von mir gemachten Beobachtung, daß in der Unterkühlung kein Kältetod eintritt, sondern daß dieser an den für jede Pflanze genau bestimmten Punkten nur bei Eisbildung beobachtet werden kann, nicht schließen können, daß der Tod durch Flüssigkeitsentzug, d. h. auf die von Müller-Thurgau und Molisch angegebene Weise eintritt. Worauf er beruht, ist allerdings völlig ungeklärt, da das Verhalten in der Unterkühlung zeigt, daß auch die inframinimale Temperatur an sich noch nicht tödlich wirkt. Nur beide Faktoren, nämlich inframinimale Temperatur und Eisbildung in den Geweben zusammen, bewirken den typischen Kältetod.

III. Die Aussalzung löslicher Eiweißstoffe durch den Gefriervorgang.

a) Aussalzung von Eiweißstoffen unbestimmter Natur.

In allerneuester Zeit hat nun Gorke[1]) die physikalische Erfrierhypothese zu modifizieren versucht. Gorke geht von der beim Studium der Eiweißstoffe viel benutzten Methode, die Eiweißkörper durch Aussalzen mittels Neutralsalzen zu gewinnen, aus. Er folgert richtig: wenn beim Gefrieren ein Wasserentzug des Zellsaftes stattfindet, so müssen bei der allmählich sich steigernden Konzentration der Zellsaftsalze die im Zellsaft gelösten Eiweißkörper ausgesalzt werden. Dieses Ausfällen der Eiweißverbindungen soll den Tod beim Gefrieren bedingen. Gegen diese Annahme machen sich in zweierlei Hinsicht Bedenken geltend.

Vor allem scheinen die Untersuchungen, auf Grund deren Gorke zu diesem Resultat gekommen ist, nicht einwandfrei zu sein.

Gorke arbeitete mit Preßsäften, die aus erfrorenen und nicht erfrorenen Pflanzen gewonnen wurden, und konstatierte hierbei, daß Preßsaft von einer erfrorenen Pflanze an aussalzbaren Eiweißstoffen ärmer ist als der Saft einer nicht erfrorenen. Ein gleiches Resultat erlangte er, wenn er frische Pflanzen auspreßte und nachträglich den Preßsaft gefrieren ließ. Hier trat in dem gefrorenen Preßsaft ein Niederschlag auf, der vor allem eiweißhaltig war. Auf den größeren oder geringeren Gehalt an aussalzbaren Eiweißkörpern in den Preßsäften schloß er, nachdem er dieselben ausgesalzen und aufs Filter gebracht hatte, indem er den Gesamtstickstoff des Niederschlages nach der Methode von Kjeldahl bestimmte. Die Kjeldahlsche Bestimmung wird von Physiologen der Dumasschen Methode der Einfachheit und leichteren Handhabung wegen vorgezogen, vor allem, wenn es sich um ein Gemisch von Eiweißkörpern handelt[2]).

Zunächst aber besagt die Angabe Gorkes, daß nach der Kjeldahlschen Methode gearbeitet ist, gar nichts. Es sind eine ganze Reihe Abänderungen und Verbesserungen dieser Methode getroffen, so daß ohne Angabe, nach

[1]) Gorke, Über chemische Vorgänge beim Erfrieren der Pflanzen, in Landw. Versuchsstationen, Bd. 65, p. 149 (1907).

[2]) Kutscher u. Steudel in Zeitschrift für physiolog. Chemie, Bd. 39, p. 12 (1903).

welcher Modifikation der Kjeldahlschen Stickstoffbestimmung die Resultate gewonnen sind, die dargestellten Ergebnisse unkontrollierbar sind. Da auch bezüglich der Zuverlässigkeit der modifizierten Methoden Meinungsverschiedenheiten bestehen[1]), ist es bedauerlich, daß Gorke nicht angibt, nach welcher Modifikation er gearbeitet hat.

Nun machten Kutscher und Steudel[2]) darauf aufmerksam, daß sich Stickstoffverluste, wenn man nicht genau die optimalen Bedingungen einhält, bis zu 7% ergeben, auch wenn die Konstitution des Eiweißkörpers — bei ganzen Gruppen von Körpern, so den Nitro- und Cyanverbindungen, ist die Kjeldahlsche Methode nicht anwendbar — einen Grund hierfür nicht erkennen läßt. Besonders bei der Oxydation mit Kupfersulfat und Kaliumpermanganat kommen große Stickstoffverluste vor, wie Kutschers und Steudels Versuche zeigen und auch von Beger[3]), Fingerling[3]) und Morgen[3]) zugegeben wird. Zwar wurde Kutscher und Steudel von verschiedenen anderen Autoren[4]) entgegengehalten, daß bei vorsichtiger und richtiger Anwendung der Kjeldahl-Methode, vor allem bei den Modifikationen von Wilfahrt[5]) und Gunning[6]) sich ganz gute Resultate mit nur 0,4% Stickstoffverlust höchstens, erreichen lassen, doch sind bei der ursprünglichen Kjeldahl-Methode und nicht sehr vorsichtigen Arbeiten unrichtige Resultate nicht zu vermeiden. Schon das von Gorke gewählte Vorgehen, einen Niederschlag zu erzeugen und diesen auf seinen Stickstoffgehalt zu untersuchen, wird von Kutscher und Steudel als nicht einwandfrei bezeichnet.

Eine bedeutende Fehlerquelle, welche Gorke nicht erwähnt, kann auch die Dauer die Aufschließung sein. Nach Sörensen und Petersen[7]) sind mindestens zwei bis drei Stunden Kochen notwendig. Kutscher und Steudel kochten nur bis zu einer Stunde und erhielten Verluste von Stickstoff bis zu 7%, wie schon erwähnt.

Vor allem ist aber die Substanzmenge, die Gorke zu seinen Untersuchungen verwandte, bedeutend zu klein. Beger, Fingerling und Morgen[8]) wandten zu ihren Untersuchungen Mengen von 0,3 g durchschnittlich an, betonen aber dabei ausdrücklich, daß dadurch die Genauigkeit schon beeinträchtigt würde, da bei so kleinen Substanzmengen, die bei der am Schluß der Methode stattfindenden Titration unvermeidlichen Fehler sich

[1]) Kutscher u. Steudel, l. c. p. 17; Beger, Fingerling und Morgen in Zeitschrift für physiolog. Chemie, Bd. 39, p. 332 (1903).

[2]) Kutscher u. Steudel, l. c. p. 12.

[3]) Beger, Fingerling und Morgen, Zeitschrift für physiolog. Chemie, Bd. 39 (1903), p. 332.

[4]) Schöndorf, Pflügers Archiv, 98 (1903), p. 130—135; Beger, Fingerling und Morgen, l. c. p. 329 ff.; Sörensen u. Petersen, Zeitschrift für physiolog. Chemie, Bd. 39 (1903), p. 514 ff.

[5]) Wilfahrt, Chemisches Zentralblatt, 1885, p. 17.

[6]) Beger, Fingerling, Morgen, l. c. p. 334.

[7]) Sörensen u. Petersen, l. c. p. 518.

[8]) Beger, Fingerling etc., l. c. p. 331.

bedeutender bemerkbar machen. Ich habe nach einer Angabe Gorkes — er fand 9,6 mg Stickstoff — die von ihm nicht angegebene untersuchte Substanzmenge zu berechnen versucht. Da er in dem aus Gerstenpflanzen-Preßsaft ausgesalzenen Niederschlag nur Spuren von Kalium und Phosphor konstatierte, habe ich Gersten-Leukosin[1]) mit 16,63% Stickstoffgehalt als Grundsubstanz des Eiweißniederschlages angenommen. In diesem Falle hätte Gorke eine Menge von 0,056 g Substanz auf Stickstoffgehalt untersucht, während die obengenannten Autoren schon eine Substanzmenge von 0,3 g für zu gering halten. Sörensen und Petersen[2]) verlangen für eine genaue Stickstoffbestimmung nach Kjeldahl einen Gehalt der angewandten Substanzmenge an Stickstoff in Höhe von 15—30 mg, während Gorke Stickstoffmengen im Gesamtgewicht von höchstens 12 mg bis zu 4,6 mg herab zu seinen Untersuchungen anwandte. Daß bei solch geringen Substanzmengen Differenzen von 4,4 mg Stickstoffgehalt als innerhalb der Versuchsfehlergrenze liegend betrachtet werden müssen, ist, wenn man die folgenden Ausführungen berücksichtigt, leicht einzusehen.

Gorke benutzte keineswegs völlig klare Preßsäfte[3]). Er gibt ausdrücklich an, daß eine völlige Klärung nur dann vorgenommen wurde, wenn sie unbedingt nötig war, da Zersetzungen durch langes Stehen beim Filtrieren und vor allem Ausfällen mancher Eiweißstoffe durch Wirkung der Tonfilterplatten vermieden werden sollten. Wie große Differenzen schon durch verschieden starke Klärung der Preßsäfte möglich sind, konnte ich bei Gelegenheit meiner Bestimmungen des spezifischen Gewichtes von Pflanzenpreßsäften erkennen. Bei meinen ersten Bestimmungen benutzte ich ebenfalls, um Zersetzungen zu vermeiden, unfiltrierten Preßsaft. Es stellte sich bei Wiederholung der Versuche mit filtriertem Preßsaft eine Differenz des spezifischen Gewichts von 0,00089, d. h. bei 20 ccm Preßsaft ein Gewichtsunterschied von 0,0178 g heraus, also mehr als der fünfte Teil der von Gorke zur Analyse verwandten Gesamtmenge des Niederschlags, obgleich gröbere Teilchen durch Hindurchpressen durch ein dickes und sehr dichtes Baumwollengewebe ferngehalten waren. Gegenüber den allein durch verschieden starke Klärung der Preßsäfte auftretenden Differenzen (in meinem Falle mehr als 20%) kommen die — noch dazu in die Fehlergrenzen der Analyse fallenden — Differenzzahlen Gorkes garnicht in Betracht.

Vor allem fällt aber folgender bei der von Gorke geübten Gewinnungsart der Preßsäfte begangener Fehler ins Gewicht. Er gibt an: „Da sich erfrorene Pflanzen, wie bekannt, leichter auspressen lassen, wurde hier der Druck nur soweit gesteigert, bis dieselbe Menge Saft wie bei den nicht erfrorenen Pflanzen erhalten war. Einige Chlorophyllkörner gingen in beiden Fällen durchs Filter.“ So wird es sehr wahrscheinlich, daß sich in dem nicht geklärten Preßsaft der gefrorenen Pflanze viel weniger Eiweißstoffe

[1]) Czapek, Biochemie der Pflanzen, II, p. 11 (Jena 1905).
[2]) Sörensen u. Petersen, l. c. p. 517. [3]) Gorke, l. c. p. 151.

(es kommt hierbei auf nicht gelöste an) finden, da die Zellen nicht derartig zerquetscht wurden, wie bei den frischen nicht gefrorenen Pflanzen.

Diese Einwände lassen die von Gorke gewonnenen Resultate keineswegs als sicher erscheinen, vielmehr fallen die gefundenen Differenzen innerhalb der Versuchsfehler seiner Methoden.

Abgesehen von dem durch Kritik der Methode gewonnenen, nicht zustimmenden Urteile über die Untersuchungen Gorkes bin ich auch in der Lage, dieselben mit positiven Gründen zu bekämpfen.

Gorke will als Todesursache das Aussalzen der löslichen Eiweißkörper durch die beim Gefrieren sich konzentrierenden Zellsaftsalze verantwortlich machen. Nun hat aber der Zellsaft eines jeden Pflanzenteils seinen spezifischen eutektischen Punkt, bei dem die letzten flüssigen Anteile in der Pflanze erstarren. Sind gelöste Eiweißstoffe im Zellsaft vorhanden, so fallen sie entweder spätestens bei Erreichung dieses Punktes aus, oder sie gefrieren für sich, unausgefällt. Unterhalb des eutektischen Punktes ist eine erstarrungsfähige Flüssigkeit, die ein Aussalzen bedingen könnte, nicht mehr vorhanden. Bei meinen schon oben besprochenen Versuchen habe ich die Temperaturkurve bis -40^0 hinab verfolgt, ohne auch nur eine Andeutung zu finden, daß nach dem eutektischen Punkt irgend ein Gefriervorgang noch stattfindet. Daß aber der eutektische Punkt mit dem Todespunkt nichts zu tun haben kann, hat schon Apelt[1]) sicher festgestellt und meine oben (p. 23 ff.) dargestellten Untersuchungen zeigen dasselbe. Insbesondere geht dies klar aus den von mir aufgenommenen Temperaturkurven über thermische Vorgänge am Todespunkte hervor. Es ist stets ein deutliches Intervall zwischen eutektischem Punkt und Todespunkt zu konstatieren, das bei Pflanzen kalter Klimate außerordentlich groß sein kann, aber auch bei solchen warmer Länder bisweilen eine Ausdehnung von 4^0 C. (*Yucca filamentosa,* Tab. XII) hat. Es kann also das Aussalzen der Eiweißstoffe beim eutektischen Punkt als Todesursache nicht in Betracht kommen; unterhalb desselben ist ein solcher Vorgang aber unmöglich.

Die Angabe Gorkes — er arbeitete auch mit frischen Preßsäften, die er gefrieren ließ — daß bei Roggenpflanzen- und Fichtennadelpreßsaft ein Niederschlag erst bei -15^0 resp. -40^0 auftrete, kann nicht richtig sein, und dies um so weniger, als der Niederschlag erst nach einigen Tagen Kältewirkung auftreten solle. Es sind neuerdings von Apelt und Rein eine große Menge genauester Gefrierpunktsbestimmungen in Pflanzenteilen gemacht worden: Nirgends lag der Gefrierpunkt resp. der eutektische Punkt des Salzgemisches der Zellsäfte tiefer als $-5{,}5^0$. Die in der Tabelle XVIII (Anhang) wiedergegebenen Temperaturkurven von Preßsäften aus *Agave americana,* einer Pflanze, deren Erfrierpunkt bei $-5{,}5^0$, deren eutektischer Punkt bei $-4{,}9^0$ liegt, habe ich aufs genaueste aufgenommen. Unter $-4{,}9^0$ ist ein flüssiger Bestandteil nicht möglich, also ebensowenig ein Ausfällen.

[1]) Apelt, l. c. p. 7.

Entweder die Eiweißstoffe werden ausgesalzen während des Gefriervorganges, solange die Komponenten Salzlösung und Eiweiß flüssig sind, oder sie werden überhaupt nicht ausgesalzen.

Es ist Gorke also nicht gelungen seine These, daß der Erfriertod im Aussalzen seine Ursache habe, zu beweisen oder auch nur wahrscheinlich zu machen.

Als ebenso unwahrscheinlich muß aber der Versuch, den er im zweiten Teil seiner Abhandlung macht, den Tod megathermer Pflanzen, welche über 0° zugrunde gehen, durch Umlagerungen der Atome innerhalb der Eiweißmolekel zu erklären, angesehen werden. Gorke folgert aus der Tatsache, daß die Reaktionsstärke der Phosphorsäure mit fallender Temperatur zunimmt, daß die phosphorhaltigen Eiweißstoffe der Pflanze bei Temperaturerniedrigung eine Umlagerung erfahren, wodurch schließlich der Tod veranlaßt werde. Bei seinen Versuchen — er neutralisierte die sauren Pflanzenpreßsäfte bei verschiedenen Temperaturen mit Kalilauge — konnte er auch eine Zunahme des Säurecharakters der in den Säften aufgelösten Stoffe konstatieren. Ob dies aber durch die Umlagerung der phosphorhaltigen Eiweißverbindungen verursacht wird, ist mehr als fraglich, da nicht erwiesen ist, daß der Phosphor oder auch nur ein Teil desselben wirklich als Phosphorsäure in der Eiweißmolekel vorhanden ist. Es ist in keiner Weise erwiesen oder auch nur wahrscheinlich, daß die im Zellsaft gelösten Salze durch die Temperaturerniedrigung sich umsetzen und eine Änderung der Acidität hervorrufen, wie das Kunisch[1]) in seiner Arbeit vermutete. Die Aktivierung der Phosphorsäure bei niedriger Temperatur ist selbstverständlich nur von der Temperatur abhängig und dieser proportional. Sie müßte doch auch bei Temperaturerniedrigungen in der Unterkühlung eintreten und eine zum Tode führende Umlagerung veranlassen. Dies ist nicht der Fall, da sämtliche von mir untersuchten Objekte auch nach den größten Unterkühlungen (*Escheveria Leopoldiana* wurde bis 7,79° unter den Todespunkt (— 3,4°), *Agave americana* bis 7,05° unter dem Todespunkt (— 5,5°) unterkühlt zweifellos lebten. Diese und beliebig viele andere Fälle bewiesen klar, daß nicht die Kälte an sich und für sich, dementsprechend nicht eine der Kälte proportional zunehmende Aktivierung von Phosphorsäure den Tod herbeiführt. Es ist, wie schon oben gesagt, außer der Temperaturerniedrigung die Änderung des Aggregatzustandes erforderlich, um die Pflanze den Kältetod sterben zu lassen.

b) Ausfällen von Fermenten durch den Gefriervorgang.

Ich habe aber noch weiter die Gorkeschen Anschauungen zu prüfen versucht, und zwar in der Weise, daß ich bestrebt war, nachzuweisen, ob vielleicht aus der ungeheuren Menge der in Frage kommenden Eiweißkörper

[1]) Kunisch, Über die tödliche Einwirkung niederer Temperaturen auf die Pflanzen, Breslau, Inaug.-Diss. (1880), p. 49.

eine bestimmte, klar definierbare Gruppe, nämlich die Fermente, sich so verhalte, wie dies Gorke für Eiweißkörper angibt. Meinen Versuchen eine Beweiskraft für oder gegen die Gorkesche These beizumessen, bin ich um so mehr berechtigt, als man doch bei Aussalzung vital wichtiger, gelöster Eiweißstoffe zunächst an Fermente denken muß.

Nach den oben angestellten Messungen in der Nähe des Todespunktes war das Ausfällen der Enzyme zwar unwahrscheinlich, doch konnte auf dem Wege der thermischen Bestimmung ein sicheres Resultat nicht erlangt werden.

Bei meinen speziell diesen Punkt betreffenden Untersuchungen ging ich von der Erwägung aus, daß sich bei zunehmender Erstarrung, da sich beim Abkühlen eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes, welches rings von einer Kältemischung umgeben ist, die feste Phase zuerst an der Gefäßwandung in Form eines Eismantels abscheidet, der innere Teil eines gefrierenden Pflanzenpreßsaftes nach und nach mit Fermenten anreichern müßte, wenn beim Gefrieren überhaupt ein Ausscheiden von Fermenten stattfindet.

Allgemein bedient man sich jetzt bei Untersuchungen mit intrazellularen Fermenten der Methode der aseptischen Autolyse[1]), d. h. man läßt den aus der Pflanze gewonnenen Preßsaft, welcher die Fermente enthält, auf die zu spaltende Substanz unter Fernhaltung von Mikroben einwirken. Meine Versuche wurden daher ebenfalls mit Pflanzenpreßsäften, die aus dem mechanisch zerkleinerten Pflanzenteil durch Anwendung eines Druckes von 300 Atmosphären mittels einer hydraulischen Pflanzenpresse gewonnen waren, angestellt. Als Objekt wurde *Agave americana* benutzt. Ein Teil des gewonnenen Preßsaftes wurde nach dem oben angegebenen Verfahren dem Gefrieren unter Umrühren ausgesetzt. Hatte sich an der Gefäßwandung $^2/_3$ des Saftes als Eismantel abgeschieden, so wurde der noch flüssige Teil abgegossen. Nach Auftauen und Abgießen der Eismantelschicht standen mir drei verschiedene Preßsäfte zur Verfügung, deren fermentative Wirkung sich, falls beim Gefrieren ein Ausscheiden von Fermenten stattgefunden hatte, in folgender Weise abstufen mußte: Der abgegossene Preßsaft (A) mußte die stärkste Fermentwirkung zeigen, da er die aus der Eismantelschicht ausgefrorenen Fermente mehr enthalten mußte, der gefroren gewesene Preßsaft (C) also die schwächste Wirkung ausüben, während der nicht behandelte Preßsaft (B) bezüglich seines Fermentgehaltes in der Mitte zwischen beiden zu rangieren hatte.

Es kam nun darauf an, die Fermentwirkung der drei verschiedenen Preßsäfte A, B und C zu konstatieren. Zur Vereinfachung der Versuche beschränkte ich mich dabei auf proteolytische und diastatische Fermente. Zur Feststellung der Wirkung der proteolytischen Fermente benutzte ich ihre Fähigkeit, Gelatine zu verflüssigen[2]). Bei den diastatischen Fermenten wandte ich ein von Wijsmann[3]) angegebenes Verfahren an. Dieser ver-

[1]) Czapek, l. c. p. 67.

[2]) Green-Windisch, Die Enzyme, p. 184, 190.

[3]) Green-Windisch, Die Enzyme (Berlin 1901), p. 61.

setzte Stärkekleister mit Gelatine und ließ die Masse erstarren. Dann gab er auf die Gelatine-Stärkemasse Diastaselösung, welche hineindiffundiert. Den Fortgang der Verzuckerung stellte er durch Jodlösung fest. Nach ein- bis zweitägiger Einwirkung konnte er konstatieren, daß sich bei Zugaben von Jodjodkaliumlösung Zonen bildeten, die von blau über violett und rot in farblos übergingen.

Mein Verfahren war folgendermaßen: Drei genau gleiche englumige Reagenzgläschen wurden bis zu einer Marke mit zehnprozentiger Gelatinelösung, die vorher ebenso wie die Gläschen sterilisiert war, gefüllt, und die Masse erstarren gelassen, sodaß in jedem Gläschen die gleiche Menge vorhanden war, und diese einer aufgegossenen Flüssigkeit die gleiche Oberfläche bot.

Sodann wurden in gleicher Weise drei Reagenzgläschen von genau gleicher Beschaffenheit bis zu einer Marke mit zweiprozentigem Stärkekleister, dem ein Zusatz von zehn Prozent Gelatine beigegeben war, um ihm Konsistenz zu verleihen, gefüllt.

In die drei Röhrchen mit zehnprozentiger Gelatine wurde von den Preßsäften A, B und C ein gleiches Quantum gefüllt, ebenso in die Röhren mit der Stärkelösung.

Dies geschah am 18. Juni 4^h 15′ nachmittags mit der Gelatinelösung und um 6^h —′ mit der Stärkelösung. Am folgenden Tage 9^h 15′ vormittags wurde kontrolliert. Auf die Gelatinelösung hatten die Fermente der Preßsäfte 17 Stunden, auf die Stärkelösung 15 Stunden gewirkt. Bei den Röhrchen mit Gelatinelösung hatte sich bei allen drei Preßsäften A, B und C eine genau gleiche schmale trübe Zone gebildet und eine kleine, bei allen gleiche Menge hatte sich verflüssigt, wie mittels der angebrachten Marken konstatiert werden konnte. Die mikroskopische Untersuchung ergab, daß es sich nicht um Bakterienwirkung handeln konnte. Der Nachweis eines proteolytischen Fermentes war also gelungen. Doch hatten die Preßsäfte A, B, C mit genau gleicher Intensität gewirkt. Ein Ausfällen durch den Gefriervorgang hatte also nicht stattgefunden.

Zu den Röhrchen mit dem Stärkekleister wurde Jodjodkaliumlösung zugegeben. Es hätte sich also, falls eine Umsetzung von Stärke in Zucker stattgefunden hatte, am oberen Meniskus eine schmalere oder breitere Zone, je nach der in dem betreffenden Preßsaft vorhandenen Fermentmenge, mit der oben angegebenen Farbenfolge zeigen müssen. Die Blaufärbung begann jedoch sogleich in der Höhe der Marke bei allen drei Preßsäften, sodaß ein diastatisches Ferment nicht konstatiert werden konnte.

Der zweite Versuch ist nicht beweisend. Doch zeigt der erste, daß ein Ausfällen von Fermenten beim Gefriervorgang sicher nicht stattfindet. Ein Einfluß des Gefrierens durch Aussalzung der Fermente ist also nicht anzunehmen, denn es ist nicht einzusehen, weshalb sich andere Fermente nicht dem bei unseren Versuchen vorhandenen proteolytischen Ferment analog verhalten sollten.

IV. Die praktische Bedeutung des Unterkühlungsphänomens für das Pflanzenleben.

1. Die Unterkühlung tritt in der Natur relativ selten ein.

Die Bedeutung der Unterkühlung könnte nach der Beobachtung, daß in ihr kein Kältetod zustande kommt, eine sehr große sein. In der Tat haben manche Autoren, besonders Pfeffer[1]), betont, daß die Unterkühlung lebensfördernd wirke. Ich habe, nachdem durch Mez[2]) bereits dasselbe gefunden war, oben darauf hingewiesen, daß die Unterkühlung gemindert resp. gehindert wird durch genau verfolgbare Ursachen. Zu diesen gehören z. B. die Interzellularen. Man wird nun beim Experiment, zu welchem stets nur kleine Pflanzenstücke verwandt werden (ich habe die Beobachtung gemacht, daß man, um möglichst tiefe Unterkühlungen zu erreichen, sehr kleine Stücke verwenden muß) Objekte benutzen, welche keine oder so gut wie keine Interzellularen besitzen. Hierher gehören z. B. die von Mez[3]) verwendeten Knoten von *Impatiens parviflora,* sowie alle von mir untersuchten parenchymatischen Stengel usw. In der Natur hingegen grenzen die dichten Gewebe fast allgemein an lockere an. Alle Durchlüftungsgewebe, welche nicht nur in den Blättern, sondern auch in Stämmen vorkommen, um nur auf eine Gewebsart hinzuweisen, hindern resp. mindern die Unterkühlung gemäß ihrem Interzellularinhalt. Da nun von vielen Autoren[4]) darauf hingewiesen wurde (was ich selbst aus vielfacher Erfahrung bestätigen kann), daß die Eisbildung im Pflanzenkörper, wenn sie eingetreten ist, sich rapid ausbreitet, so wird das Unterkühlungsphänomen wesentlich auf Laboratorien-Experimente beschränkt sein, in der Natur aber relativ selten vorkommen, auch kaum jemals die Tiefe wie im Experiment erreichen und demgemäß eine geringe praktische Bedeutung gewinnen. Tatsächlich ergeben die z. B. mit Blättern (als ganzen Organen) gemachten Unterkühlungsversuche nur ganz geringe Temperaturabfälle.

Müller-Thurgau[5]) unterkühlte ganze Blätter von Rose, Tulpe, Bohne auf — 3° acht Stunden lang. Ebenso maß er die Unterkühlung von Blättern im Freien. Er fand bis — 4° Unterkühlung. Die Lufttemperatur betrug — 1,3°[6]). Wie groß in diesen Fällen der Unterkühlungsgrad (Differenz von Eisbildungs- und Unterkühlungspunkt) war, ist nicht angegeben; er kann aber allerhöchstens 2° betragen haben.

Daß inframinimale Temperatur allein für sich den Kältetod nicht herbeiführen kann, ist oben nachgewiesen, doch scheint mir nach einer Beobachtung Molischs[7]) eine Schädigung der Protoplasten nicht ausgeschlossen. Molisch schreibt: „Staubfädenhaare von *Tradescantia* erlitten bei Unterkühlung bis — 9° während sechs Stunden keine Schädigung, außer daß sich der Protoplast von der Wand stellenweise abhob, also Wasser

[1]) Pfeffer, Pflanzenphysiologie, II. p. 310 (Leipzig 1904).
[2]) Mez, l. c. p. 104. [3]) Mez, l. c. p. 98. [4]) Mez, l. c. p. 111.
[5]) Müller-Thurgau in Landw. Jahrbüchern XV, p. 489, 490.
[6]) Durch Ausstrahlung von Wärme sinkt die Temperatur der Blätter unter die Temperatur der umgebenden Luft. [7]) Molisch, l. c. p. 25.

ausstieß.“ Ist diese Beobachtung von Molisch richtig, so muß man m. E. eine Beeinträchtigung der Lebensfunktion des Protoplasten bei Unterkühlung annehmen. Denn nach Klemm[1]), der die mannigfachsten Einflüsse, die Desorganisationserscheinungen hervorrufen, studierte, deutet eine Turgorverminderung (um eine solche handelt es sich bei der von Molisch gemachten Beobachtung zweifellos) ein Agens an, das von geringer aber immerhin vorhandener Schädlichkeit ist. Klemm hält Kontraktionen des Protoplasmas für ein Zeichen, daß die beginnende Desorganisation nicht plötzlich zum Tode führt, sondern ein nur allmähliches Ableben veranlaßt. Es würde sich dabei also um Schädigung durch den Temperaturwechsel handeln, keineswegs aber um Kältetod. In die gleiche Kategorie von Schädigungen dürften die von Apelt[2]) beobachteten gehören, welche durch wiederholte Abkühlung eines Objektes bis dicht über den Todespunkt eintreten. Auch hier handelt es sich beim Eingehen der Versuchsobjekte nicht um typischen Kältetod, sondern um nicht genauer definierbare, aber stets vorhandene Schwächungen der Protoplasten durch die Kälte.

2. Über verschiedene Unterkühlungspunkte verschiedener Gewebe desselben Pflanzenteils.

Daß Differenzen zwischen den Erfrierpunkten der verschiedenen Gewebe eines Pflanzenteils bestehen, ist schon lange bekannt[3]). Untersuchungen aber über Differenzen der eutektischen Punkte und Gefrierpunkte von verschiedenen Geweben eines und desselben Pflanzenteils wurden noch nicht angestellt. Anlaß zu diesen Versuchen gab die Beobachtung, daß bei stark sukkulenten Pflanzen die eutektischen Punkte völlig konstant waren, sobald man Stücke aus ein und demselben Gewebe nahm, daß dies jedoch nicht der Fall war, wenn man Stücke benutzte, die sowohl parenchymatisches Wassergewebe als auch Chlorophyllgewebe enthielten. Die Untersuchungen wurden mit einer größeren Anzahl von sukkulenten Pflanzen angestellt. Zuerst wurde von jedem Objekt die genaue Temperaturkurve sowohl der Chlorophyllschicht, als des zentralen Wassergewebes aufgenommen. Diese Kurven ließen zwischen den eutektischen Punkten der beiden Gewebsschichten große Differenzen erkennen, während für den Beginn des Gefrierens bei den Gewebsschichten nur eine geringe Differenz zu konstatieren war. Die beigefügte Tabelle zeigt dies deutlich (siehe Tabelle XIX).

Von den Faktoren, welche einen Einfluß auf die Lage der eutektischen Punkte haben konnten, lag am nächsten, den verschiedenen Gehalt an gelösten Salzen dafür verantwortlich zu machen. Es wurde daher das spezifische Gewicht der Preßsäfte beider Gewebsschichten bestimmt.

Als Objekte waren *Agave americana* und *Euphorbia antiquorum* geeignet. Die Chlorophyllschicht wurde bei beiden von dem Wassergewebe

[1]) P. Klemm, Desorganisationserscheinungen der Zelle, in Pringsheims Jahrbüchern für wissensch. Botanik, Bd. 28 (1905), p. 675.

[2]) Apelt, l. c. p. 44. [3]) Molisch, l. c. p. 30; Apelt, l. c. p. 35 ff.

sorgfältig getrennt und die Preßsäfte gesondert gewonnen, doch so, daß die Grenzschicht zwischen beiden Gewebsarten nicht verwendet wurde. Die Preßsäfte wurden filtriert, um sie völlig klar zu bekommen, und dann ihr spezifisches Gewicht mit Hilfe des Pyknometers bestimmt. Es ergab sich, daß der Saft der Chlorophyllschicht ein größeres spezifisches Gewicht besaß, als der Saft des zentralen Wassergewebes (s. Tabelle XX). Dieser Unterschied ist auf größeren Gehalt an gelösten Salzen und osmotischen Stoffen überhaupt zurückzuführen. Die Tabelle zeigt die Differenzen zwischen den eutektischen Punkten der Gewebsschichten und den dazu gehörigen spezifischen Gewichten.

Tabelle XX.

Gewebsschicht	Spezifisches Gewicht	Beginn des Gefrierens	Eutektischer Punkt	Todespunkt
	1. Agave americana.			
Chlorophyllschicht .	1,01121	—0,68°	—5,65°	—6,6°
Wassergewebe . .	1,01032	—0,65°	—4,20°	—5,9°
Differenz	0,00089	0,03°	1,45°	0,7°
	2. Euphorbia antiquorum.			
Chlorophyllschicht .	1,00649	—0,70°	—6,30°	—9,30°
Wassergewebe . .	1,00504	—0,75°	—3,09°	—5,70°
Differenz	0,00145	0,05°	3,21°	3,60°

Dieses Resultat wirft ein eigenartiges Licht auf die Bedeutung der Unterkühlung. Wie oben (p. 18) schon gezeigt wurde, hat die Konzentration der Zellsäfte direkt keinen Einfluß auf den Unterkühlungsgrad, doch verursachen alle unterkühlungshemmenden Faktoren bei stärker konzentrierten Lösungen viel leichter ein Erstarren, als bei schwächer konzentrierten. Da nun der Zellsaft in der Rindenschicht, wie oben nachgewiesen wurde, eine bedeutendere Konzentration an gelösten Stoffen besitzt, als der des Wassergewebes, so werden die überall in der Natur in Erscheinung tretenden unterkühlungshemmenden Faktoren eine größere Unterkühlung unmöglich machen. Und da beim Zellsaft des Chlorophyllgewebes, infolge seiner größeren Konzentration eine viel größere Erstarrungswahrscheinlichkeit vorliegt, und die Eisbildung sich augenblicklich durch die Pflanze fortpflanzt, ist in der Natur, wo überall innerhalb desselben Pflanzenkörpers Zellen mit verschiedener Konzentration des Zellsaftes vorkommen, eine sehr tiefe Unterkühlung kaum möglich. Das zentrale Wassergewebe, welches infolge seiner Zellsaftbeschaffenheit eine tiefere Unterkühlung zuließe, wird durch die bald eintretende Erstarrung der Rindenschicht zur Eisbildung mit fortgerissen. Dies ist ein weiterer Grund, die Bedeutung der Unterkühlung für das Leben der Pflanzen nicht allzu hoch anzuschlagen. Meine Anschauung steht mit der Müller-Thurgaus[1]) und Molischs[2]), welche

[1]) Müller-Thurgau, Landw. Jahrbücher, IX, p. 185. [2]) Molisch, l. c. p. 18.

gerade in der Konzentration des Zellsaftes ein unterkühlungsförderndes Moment sahen, in Widerspruch, doch stütze ich meine Ansicht auf die physikalisch-chemischen Arbeiten von de Coppet[1]), Jaffé[2]) und Ostwald[3]).

Die Unterkühlung ist eine Begleiterscheinung und Folge des kapillaren Aufbaues der Pflanze, trägt aber kaum zum Schutze des Lebens in der Pflanze bei Temperaturwechsel bei.

Zusammenstellung.

Die Resultate der vorstehenden Arbeit über Unterkühlung und Kältetod der Pflanzen können in folgende Sätze kurz zusammengefaßt werden:

1. Der Kältetod der Pflanzen tritt niemals im Zustand der Unterkühlung der Zellsäfte ein, mag dieselbe so tief unter den spezifischen Todespunkt getrieben werden wie nur möglich.

2. Der typische Kältetod tritt auch bei megathermen Pflanzen niemals über dem Eispunkt ein.

Satz 1 und 2 zusammengezogen bedeuten: Zum Eintritt des typischen Kältetodes ist Eisbildung in den Geweben notwendig.

3. Diese Eisbildung an sich allein ist gleichfalls nicht die Ursache des typischen Kältetodes.

4. Die Todesursache wird gebildet gemeinsam durch Eintreten der Eisbildung und Abkühlung unter das jeweilige spezifische Minimum, welches unter Umständen außerordentlich tief unter dem eutektischen Punkt der Salzmischungen im Zellsaft liegen kann.

5. Der Kältetod tritt nicht ein infolge der Aussalzung im Zellsaft oder Protoplasma gelöster Eiweißstoffe oder Fermente.

6. Auch die Aktivierung der Phosphorsäure in phosphorhaltigen Eiweißstoffen durch die Kälte ist nicht Ursache des Kältetodes.

7. Das Unterkühlungsphänomen hat für die Lebenserhaltung der Pflanzen keine irgendwie in Betracht kommende Bedeutung.

8. Das Unterkühlungsphänomen bei Pflanzen ist überhaupt im wesentlichen ein Laboratoriumsexperiment und tritt im Leben viel seltener und in sehr viel geringerer Tiefe auf, als dies bisher allgemein angenommen wurde.

9. Die früher gemachten Beobachtungen über Unterkühlungshemmung, speziell durch in der Flüssigkeit gelöste Luft sowie durch Pflanzenschleim, wurden bestätigt.

[1]) de Coppet, zitiert bei Ostwald, Allgemeine Chemie, II², p. 752.

[2]) Jaffé, Studien an übersättigten Lösungen, Zeitschrift für physikalische Chemie, Bd. 43, p. 574, 583.

[3]) W. Ostwald, Allgemeine Chemie, I, p. 993 ff.; II², 382 ff., 704 ff.

Anhang.

Tabelle III (siehe Text Seite 12).

1. *Verbascum phlomoides* (Blattstiel).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro ′
—100	—52	48	11,4
—120	—58	62	10,3
—91	—47	44	10,3
—139	—62	77	9,5
—99	—45	54	9,5
—105	—56	49	9,5
—90	—53	37	9,5
—80	—49	31	9,5
—131	—56	75	8,7
—112	—45	67	8,1
—70	—50	20	8,0
—132	—57	75	7,6
—117	—49	68	7,6
—111	—61	50	7,6
—132	—60	72	6,7
—104	—52	52	6,7
—105	—58	47	6,3
—135	—58	77	5,0

2. *Sedum spectabile* (Blatt).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro ′
—100	—30	70	7,6
—113	—25	88	6,3
—63	—18	45	6,3
—99	—31	68	6,0
—62	—22	40	6,0
—98	—14	84	5,4
—131	—27	104	5,2
—118	—26	92	3,9
—125	—34	89	3,9
—90	—33	57	3,5
—110	—32	78	2,6

3. *Rumex obtusifolius* (Blattstiel).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—106	—36	70	6,7
—97	—29	68	6,3
—107	—34	73	6,0
—105	—35	70	6,0
—65	—39	26	6,0
—104	—34	70	5,7
—103	—37	66	5,7
—90	—30	60	5,7
—79	—37	42	5,7
—117	—40	77	5,4
—97	—36	61	5,4
—90	—36	54	5,2
—97	—32	65	4,8
—89	—41	48	4,8
—104	—39	65	4,6
—81	—55	26	3,8

4. *Yucca filamentosa* (Blatt).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—68	—39	29	8,7
—75	—45	30	8,1
—66	—48	18	8,1
—60	—52	8	8,1
—78	—60	18	7,6
—81	—61	20	7,1
—70	—55	15	7,1
—87	—55	32	6,7
—78	—48	30	6,7
—88	—73	15	6,3
—79	—38	41	6,0
—85	—58	27	5,7
—75	—58	17	5,7
—82	—65	17	5,4
—89	—64	25	5,0

5. *Helleborus hybridus* (Blattstiel).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—115	—89	26	8,7
—110	—85	25	7,6
—111	—99	18	7,6
—121	—95	26	7,1
—123	—86	37	6,7
—138	—110	28	6,7
—131	—103	28	6,7
—100	—76	24	6,7
—130	—107	23	6,7
- 100	—85	15	6,3
—133	—101	32	6,0
—126	—95	31	6,0
—93	—72	21	6,0
—110	—82	28	6,0
-129	—87	42	4,8
—120	—100	20	4,8

6. *Sedum purpurascens* (Blatt).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—102	—15	87	14,2
—100	—15	85	9,5
—99	—20	79	9,5
—90	—21	69	9,5
—114	—19	95	7,6
—104	—18	86	7,6
—90	—17	73	7,6
—104	—14	90	7,1
—78	—12	66	6,3
—119	—18	101	6,0
—115	—19	96	6,0
—104	—17	87	6,0
—122	—16	106	5,7
—98	—14	84	5,7
—130	—18	112	5,0

7. *Papaver pinnatifidum* (Blütenstengel).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—103	—38	65	7,6
—80	—34	46	7,6
—72	—35	43	7,1
—102	—32	70	5,7
—103	—36	67	5,4
—88	—31	57	5,2
—103	—38	65	5,0
—103	—41	62	5,0
—100	—34	66	4,8
—107	—31	76	4,6
—78	—40	38	4,6
—95	—58	37	4,2
—108	—40	68	4,0
—100	—38	62	4,0

8. *Rhododendron canadensis* (Blattstiel).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—99	—70	29	7,6
—91	—69	22	5,0
—84	—62	22	5,0
—75	—57	18	4,8
—94	—63	31	4,6
—62	—51	11	4,6
—96	—55	41	4,4
—70	—47	23	4,4
—88	—72	17	3,9
—89	—72	17	3,9
—89	—55	34	3,8
—75	—50	25	3,7
—100	—62	38	3,6
—102	—66	36	3,3

9. *Hedera Helix* (junger Stengelteil).

1 Skalenteil = 0,0926° C.

Unterkühlung Skalenteile	Anstieg Skalenteile	Unterkühl.-grad Skalenteile	Abkühl.-geschwind. bei —3,7° C. Grad C. pro '
—116	—65	51	8,1
—104	—65	39	8,1
—108	—75	33	8,1
—117	—69	48	7,6
—110	—66	44	7,6
—103	—72	31	7,6
—105	—78	27	7,6
—98	—75	23	7,6
—104	—76	28	6,7
—80	—65	15	6,7
—122	—66	56	6,3
—118	—63	55	6,0
—121	—80	41	6,0

Tabelle IX*) (siehe Text Seite 26).

a) 1 Skalenteil = 0,0926° C. 1. *Saxifraga crassifolia.* Todespunkt bei —12,6° C.

Nullpunkt = 0,0° C.	Grad Celsius				—4,65°				—9,3°				—13,95°						—18,3°				—22,02°	
	Skalenteile —10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Anzahl der Sekunden, die das Objekt braucht, um von dem angegebenen Skalenteil um weitere 10 Skalenteile = 0,926° zu fallen.	—	15″	10″	16″	**56″**	17″	17″	19″	23″	***26″***	20″	15″	10″	8″	8″	5″	6″	5″	6″	5″	—	—	—	—
	—	18	12	10	**15**	3	7	8	12	12	***18***	14	10	6	6	6	5	4	5	5	4	3	—	—
	—	19	18	8	6	7	3	5	5	8	**16**	**16**	15	9	4	4	5	4	3	—	—	—	—	—
		—	15	12	3	5	4	6	11	17	17	**20**	11	9	6	4	4	3	4	4	—	—	—	—
		11	18	11	13	28	32	18	**34**	28	18	13	12	7	6	6	5	6	5	6	—	—	—	—
		—	—	6	7	7	8	17	36	**44**	27	16	12	10	9	9	8	7	5	6	8	9	—	—
		15	10	**11**	9	13	15	18	**47**	37	23	15	14	10	6	6	7	6	7	5	6	6	5	5
		—	38	52	**55**	45	35	35	28	22	18	17	16	13	11	11	9	12	10	12	8	9	11	—
		20	12	11	10	9	15	16	24	30	**33**	26	16	13	12	11	7	7	7	8	6	8	7	9
		40	28	17	10	10	**38**	37	31	23	21	13	9	9	10	9	10	8	7	9	9	10	10	—
		36	24	15	12	12	13	19	32	**49**	40	30	26	18	15	10	9	8	8	8	8	8	10	—
		40	22	20	15	9	9	8	12	27	**35**	**35**	21	19	14	13	8	6	5	6	5	7	8	—
		15	15	15	15	10	15	31	29	**37**	28	22	19	14	12	11	12	9	8	9	10	11	12	—

Todespunkt —12,6° C.

*) 1. Die fetten Ziffern geben das Minimum der Abkühlungsgeschwindigkeit an, an der betreffenden Stelle wird also durch einen Kristallisationsvorgang im Innern des Objekts Wärme erzeugt!

2. Die Zahlen rechts von der mit Todespunkt bezeichneten Linie geben die Abkühlungsgeschwindigkeit beim Todespunkt an.

b) 1 Skalenteil = 0,02° C.; Kühlstelle KCl +Eis. Siehe Anmerkung S. 44.

Nullpunkt	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																								
		240	230	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	+10	0
	Skalenteil																									
−10,4° C.	−110	—	—	16″	11″	**13″**	8″	7″	6″	9″	5″	6″	6″	*9″*	5″	4″	4″	5″	5″	3″	4″	4″	2″	2″	3″	4″
−10,5° C.	−105	—	—	6	7	7	6	5	6	**8**	6	**5**	5	5	4	5	4	5	4	3	4	5	4	3	3	4
−10,4° C.	−110	—	**16**	11	9	10	10	9	7	6	6	5	5	5	5	*6*	4	3	5	5	5	4	3	3	2	3
−10,5° C.	−105	—	—	5	10	9	10	16	27	**30**	26	18	15	13	12	11	9	7	6	7	8	5	5	5	4	5
−10,4° C.	−110	11	6	6	10	13	13	14	17	20	21	**27**	14	13	13	12	10	9	9	8	8	7	6	6	6	6
−10,7° C.	−95	14	13	14	**15**	14	13	12	10	10	10	9	7	6	6	6	6	5	5	5	4	4	5	4	3	4
−10,5° C.	−105	**28**	19	13	13	11	8	7	8	6	7	4	*9*	6	4	4	5	3	4	4	3	3	3	2	3	2

Nullpunkt	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																		
		0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
	Skalenteile																			
−10,4° C.	−110	4″	4″	4″	4″	3″	4″	3″	4″	4″	3″	3″	4″	3″	3″	3″	—	—	—	
−10,5° C.	−105	4	3	2	2	3	2	2	**3**	2	2	3	2	2	3	2	—	—	—	
−10,4° C.	−110	3	2	2	**3**	2	2	2	3	2	2	3	2	3	2	2	—	—	—	
−10,5° C.	−105	5	4	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	2	2	2	—	—	—	
−10,4° C.	−110	6	6	5	4	3	4	4	3	4	3	3	4	3	3	3	**4**	—	—	
−10,7° C.	−95	4	3	3	3	4	3	3	2	2	3	2	2	3	2	1	1	—	—	
−10,5° C.	−105	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	—	—	

Todespunkt −12,6° C.

c) 1 Skalenteil = 0,0102° C.; Kühlstelle KCl +Eis. Siehe Anmerkung S. 44.

Nullpunkt	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile												
		220	180	140	100	60	+20	−20	60	100	140	180	220	260
	Skalenteile													
−10,7° C.	−190	9″	8″	8″	9″	8″	6″	6″	6″	5″	5″	5″	5″	5″
−10,6° C.	−200	17	15	15	11	12	11	10	10	11	10	9	9	8
−10,5° C.	−210	26	16	16	11	11	9	8	9	8	7	6	6	6
−10,6° C.	−200	8	7	5	5	5	4	4	3	3	4	3	3	3

Todespunkt −12,6° C.

Tabelle X (siehe Text S. 26).

a) 1 Skalenteil = 0.0926° C. — 2. *Helleborus hybridus* (Blattstiel). — Todespunkt bei —11,6° C.

Nullpunkt	Todespunkt																									
			—0,93°	—1,86°	—2,79°	—3,72°	—4,65°	—5,58°	—6,51°	—7,44°	—8,37°	—9,30°	—10,23°	—11,16°	—12,09°	—13,02°	—13,95°	—14,88°	—15,81°	—16,74°	—17,67°	—18,60°	—19,53°	—20,46°		
														Skalenteile												
		0	—10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
0,0° C.	—11,6° C.	50″	*80″*	24″	11″	10″	10″	17″	**25**″	23″	16″	19″	23″	***22***″	20″	17″	15″	13″	14″	13″	12″	—	—	—	—	—
		—	—	22	16	16	16	27	**29**	**29**	27	26	31	33	***37***	25	25	19	21	22	22	29	—	—	—	—
		—	—	19	**21**	17	12	10	10	13	13	12	15	***17***	13	13	12	10	11	10	9	6	6	7	7	7
		—	—	38	12	10	10	11	16	28	**30**	25	24	23	***33***	32	21	20	16	12	13	14	16	17	18	—
		50	32	19	19	19	20	24	23	24	**27**	21	20	20	22	***27***	18	6	4	4	9	9	10	11	12	—
		23	22	23	20	15	12	8	16	**34**	21	28	29	***30***	25	24	23	16	18	14	10	8	10	8	8	7
		7	27	17	10	10	12	10	15	16	**17**	14	16	24	21	***25***	21	16	13	11	9	8	6	6	6	4
		44	18	8	9	**10**	8	7	8	12	12	14	16	18	19	***29***	23	17	17	10	10	7	7	6	5	6

Todespunkt —11,6° C.

Hier scheint beim Todespunkt ein thermischer Vorgang stattzufinden, doch ist das nicht der Fall; das schräg-fettgedruckte Minimum der Abkühlungsgeschwindigkeit wird durch den eutektischen Punkt der Chlorophyllschicht verursacht, während das fettgedruckte Minimum hier allein in Betracht kommt; es ist der eutektische Punkt des zentralen Wassergewebes, für das der oben angeführte Todespunkt gilt. Die Rindenschicht hatte einen viel tieferen Todespunkt. Es kommt diese Differenz der eutektischen Punkte später zur Sprache, pag. 36 f. Daß von einem Kristallisationsvorgang beim Todespunkt nicht die Rede sein kann, zeigen die folgenden Tabellen.

b) 1 Skalenteil = 0,0202° C.

Nullpunkt [KCl+Eis]	Todespunkt berechnet bei																									
	Skalenteil																									
		260	240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	—20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
—10,2° C.	—70	—	5″	5″	8″	7″	7″	9″	10″	11″	**16**″	13″	10″	10″	10″	8″	8″	8″	7″	7″	7″	5″	4″	4″	—	—	—
—10,5° C.	—55	—	5	5	7	6	7	7	10	16	28	**34**	19	18	14	11	9	8	7	6	5	5	5	6	5	—	—
—10,4° C.	—60	5	6	5	8	8	8	11	11	11	13	**14**	13	14	13	11	11	11	**9**	8	8	5	5	5	6	5	—
—10,6° C.	—50	—	—	19	14	11	10	9	10	**13**	10	9	7	8	9	7	6	7	5	5	5	5	5	5	—	—	—
—10,4° C.	—60	—	12	10	10	10	10	8	12	13	15	19	**21**	15	14	12	11	11	8	9	8	7	7	7	7	7	—
—10,5° C.	—55	—	—	—	—	17	13	12	**17**	**17**	15	15	14	11	10	8	9	6	6	6	5	6	6	6	4	3	—
—10,4° C.	—60	—	—	—	—	—	—	—	17	17	19	**27**	25	19	15	12	11	10	8	7	**7**	8	7	5	5	5	—

Todespunkt —11,6° C.

c) 1 Skalenteil = 0,0102° C.

Nullpunkt [KCl + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																	
		240	210	180	150	120	90	60	+30	0	−30	60	90	120	150	180	210	240	
	Skalenteil																		
−10,8° C.	−80	—	**15″**	10″	8″	7″	7″	7″	5″	7″	4″	5″	3″	3″	4″	3″	4″	—	
−10,7° C.	−90	**9**	8	6	6	6	6	5	6	6	5	6	4	4	3	4	—	—	
−10,5° C.	−110	—	—	**23**	15	15	12	11	11	11	10	9	8	8	7	6	7	8	
−10,4° C.	−110	7	**8**	6	5	5	7	6	6	6	7	7	7	7	6	6	7	7	
−10,4° C.	−110	**20**	20	14	13	12	12	11	9	9	8	6	6	7	6	7	6	—	

Todespunkt −11,6° C.

Nullpunkt [KCl + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																											
		240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	−20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240			
	Skalenteil																												
−10,4° C.	−120	—	—	—	7″	8″	7″	6″	6″	6″	7″	6″	5″	6″	4″	4″	3″	4″	4″	3″	3″	3″	2″	4″	3″	—			
−10,3° C.	−130	—	10	9	5	5	4	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	**3**	—	—			
−10,3° C.	−130	—	12	8	7	6	**10**	6	3	4	**3**	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	—	—			

Todespunkt −11,6° C.

Tabelle XI*) (siehe Text Seite 26).

a) 1 Skalenteil = 0,0926° C. 3. *Anemone japonica* (Blütenstengel). Todespunkt bei −7,2° C.

Nullpunkt	Todespunkt	0°		−4,65°						−9,3°						−13,95°					−18,60°				
		Skalenteile																							
		0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	
0,0° C.	−7,2° C. = bei −78 Skalenteilen	47″	*52″*	23″	20″	11″	36″	**51″**	49″	43″	31″	29″	22″	19″	19″	14″	13″	14″	19″	28″	26″	—	—	—	
		—	*55*	25	18	11	8	15	28	**35**	31	29	**23**	14	13	12	10	9	7	7	6	6	—	—	
		—	*30*	13	13	11	13	13	18	**32**	26	19	16	14	13	8	7	7	7	6	5	4	—	—	
		6	*45*	19	13	11	12	**53**	20	***24***	18	17	15	14	9	6	7	5	4	4	4	4	—	—	
		—	*39*	20	16	15	12	22	27	**35**	**35**	20	17	14	12	11	—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	*55*	21	8	7	9	13	17	**35**	33	32	16	14	13	10	9	7	5	5	6	7	—	—	

Todespunkt −7,2° C.

*) Vergleiche hierzu die Bemerkung zu Tabelle X (p. 46). Da die eutektischen Punkte der Chlorophyllschicht und des zentralen Wassergewebes hier jedoch nicht scharf auseinanderfallen, mußte von einer differenten Bezeichnung der eutektischen Punkte abgesehen werden.

b) 1 Skalenteil = 0,0202° C.

Nullpunkt [Rohrzucker + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																												
		260	240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	−20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240			
	Skalenteile																													
−8.4° C.	+60	27″	26″	18″	**21″**	19″	18″	16″	16″	16″	12″	11″	10″	11″	11″	10″	9″	7″	7″	6″	5″	7″	7″	7″	—	—	—			
−8.0° C.	+40	12	15	15	20	**22**	18	14	14	13	10	9	8	7	8	7	7	7	5	4	5	4	5	4	—	—	—			
−8.0° C.	+40	—	—	—	—	—	18	20	**25**	**25**	24	23	24	18	19	16	12	10	8	9	8	8	7	7	—	—	—			
−7,8° C.	+30	8	6	5	7	8	8	12	**17**	**17**	15	15	15	13	12	10	10	9	7	5	5	5	4	4	—	—	—			
−7,2° C.	0	—	6	6	7	8	10	7	8	11	**14**	13	12	11	11	12	10	6	7	7	5	4	4	4	—	—	—			

Todespunkt −7,2° C.

c) 1 Skalenteil = 0,0102° C.

Nullpunkt [Rohrzucker + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																												
		260	230	200	170	140	110	80	50	+20	−10	40	70	100	130	160	190	210	240											
	Skalenteile																													
−8,0° C.	+80	**13″**	**13″**	12″	11″	8″	8″	8″	6″	6″	7″	6″	5″	6″	5″	6″	6″	—	—											
−7,2° C.	0	15	20	**21**	19	19	16	14	15	14	10	10	8	8	9	7	8	7	—											
−7,1° C.	−10	17	17	17	**19**	18	14	15	14	13	11	9	9	9	9	9	7	5	—											

Todespunkt −7,2° C.

Nullpunkt [Rohrzucker + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																												
		260	240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	−20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220				
	Skalenteile																													
−7,0° C.	−20	—	—	—	—	**16″**	15″	12″	12″	7″	7″	7″	7″	6″	6″	6″	5″	4″	4″	4″	4″	3″	4″	3″	3″	—				
−6,9° C.	−30	**21**	16	13	10	8	8	7	9	8	6	6	6	5	5	4	4	4	3	3	4	3	—	—	—	—				

Todespunkt −7,2° C.

Tabelle XII (siehe Text Seite 26).

a) 1 Skalenteil = 0,0926° C. — 4. *Yucca filamentosa* (Blatt). — Todespunkt —10,9° C.

Nullpunkt	Todespunkt	—4,65°					—9,3°					—13,95°								—18,6°	
		Skalenteile																			
		—20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
0,0° C.	—10,9° C.	—	22″	31″	29″	**37″**	22″	21″	20″	20″	17″	16″	12″	13″	12″	10″	9″	10″	9″	9″	—
	= —118	35	41	13	10	12	**20**	18	14	12	10	9	10	10	7	8	8	7	6	—	—
	Skalenteilen	—	**35**	25	21	20	15	13	12	11	11	8	8	9	9	10	9	7	7	7	—
		—	20	22	20	**23**	22	15	12	13	13	13	11	9	9	8	8	8	8	8	—
		35	27	27	**46**	23	14	16	14	13	11	12	12	9	8	7	7	7	7	7	—
		38	16	10	**26**	19	11	10	10	10	10	8	7	6	6	6	6	6	4	—	—
		—	19	16	**20**	18	15	11	10	9	7	6	6	6	6	6	5	6	6	5	—
		55	21	15	8	11	**15**	12	9	9	10	8	7	5	5	5	4	4	4	5	—

Todespunkt —10,9° C.

b) 1 Skalenteil = 0,0202° C.

Nullpunkt [KCl + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																		
		240	210	180	150	120	90	60	+30	0	—30	60	90	120	150	180	210	240		
	Skalenteil																			
—10,6° C.	—15	**11″**	10″	9″	9″	9″	9″	8″	8″	7″	5″	4″	3″	4″	5″	5″	4″	—		
—10,5° C.	—20	**16**	13	11	11	11	12	11	10	9	7	8	8	8	7	6	—	—		
—10,5° C.	—20	—	—	**13**	13	12	8	7	7	6	6	6	5	5	5	4	4	3		
—10,3° C.	—30	**14**	13	12	11	10	9	8	8	8	7	7	5	5	5	4	3	3		
—10,3° C.	—30	7	6	7	5	4	5	5	4	4	5	5	4	5	5	4	—	—		
—10,2° C.	—35	13	17	21	**24**	21	15	12	11	9	7	6	5	5	6	4	5	—		
—10,2° C.	—35	12	**14**	13	12	10	11	11	12	11	8	9	7	7	6	6	6	—		
—10,2° C.	—35	16	18	17	**19**	18	18	16	17	16	14	13	13	14	13	—	—	—		
—10,0° C.	—45	**15**	13	12	12	12	12	11	8	7	7	6	6	5	5	5	5	—		

Todespunkt —10,9° C.

c) 1 Skalenteil = 0,0102° C.

Nullpunkt [KCl + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile												
		240	200	160	120	80	+40	0	−40	80	120	160	200	240
	Skalenteil													
−10,5° C.	−40	**11″**	8″	9″	8″	9″	8″	6″	6″	5″	7″	6″	5″	—
−10,5° C.	−40	—	**15**	10	9	6	6	6	6	5	5	5	5	—
−10,4° C.	−50	11	**12**	11	10	8	7	7	8	7	6	6	7	—
−10,4° C.	−50	8	7	8	8	7	6	6	5	4	5	5	—	—
−10,3° C.	−60	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	—
−10,2° C.	−70	9	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	5	—
−10,2° C.	−70	10	9	9	7	6	6	8	7	8	7	6	7	—
−10,2° C.	−70	—	**15**	10	9	6	6	6	**6**	5	5	5	5	—

Todespunkt −10,9° C.

Tabelle XIII (siehe Text Seite 26).

a) 1 Skalenteil = 0,0926° C.

5. *Tradescantia pilosa* (Stengel).

Todespunkt −6,9° C.

Nullpunkt	Todespunkt	0°		−4,65°					−9,3°						−13,95°							−18,6°	
		Skalenteile																					
		0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
0,0° C.	−6,9° C. = −75 Skalenteilen	—	—	45″	30″	27″	**53″**	45″	43″	20″	21″	13″	13″	10″	10″	10″	10″	—	—	—	—	—	—
		5	55	28	13	10	19	**41**	17	14	13	12	11	8	7	5	5	5	5	5	4	5	4
		—	20	12	12	14	17	**18**	17	12	12	10	10	7	5	6	4	4	3	3	3	3	3
		41	36	15	10	19	**32**	23	16	13	10	9	9	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		40	20	10	10	10	10	**14**	10	9	6	5	4	4	3	3	3	3	3	3	4	3	—
		9	49	22	12	15	**35**	30	20	12	11	7	7	6	5	5	4	4	3	4	—	—	—
		14	49	17	15	17	29	**44**	24	20	10	9	7	6	6	6	6	6	4	5	4	4	—

Todespunkt −6,9° C.

b) 1 Skalenteil = 0,0202° C.

Nullpunkt [$ZnSO_4$ + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																							
		240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	−20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
	Skalenteil																								
−6,05° C.	−43	—	—	—	12″	12″	**15**″	13″	12″	12″	12″	12″	12″	9″	9″	8″	7″	8″	7″	8″	7″	—	—	—	—
−6, ° C.	−45	—	—	23	12	11	8	8	10	**15**	14	13	10	10	10	9	8	7	7	6	4	4	4	4	3
−6,1° C.	−40	24	10	9	8	7	7	10	12	**16**	12	11	11	9	10	8	7	5	5	4	4	4	4	3	3
−6,0° C.	−45	—	—	—	11	7	6	8	9	11	**13**	12	10	10	10	10	10	7	7	5	5	3	3	3	—
−6,0° C.	−45	—	—	—	6	9	8	**15**	10	10	10	10	10	10	7	6	5	6	4	4	3	4	3	3	—
−6,05° C.	−43	—	—	—	10	10	10	**13**	12	10	9	9	9	7	8	7	6	6	5	4	4	3	3	3	3

Todespunkt −6,9° C.

c) 1 Skalenteil = 0,0102° C.

Nullpunkt [$ZnSO_4$ + Eis]	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																	
		240	210	180	150	120	90	60	+30	0	−30	60	90	120	150	180	210	240
	Skalenteil																	
−6.2° C.	−70	12″	12″	13″	**21**″	20″	15″	14″	11″	10″	10″	7″	7″	6″	6″	5″	5″	—
−6,2° C.	−70	9	10	11	11	14	**15**	12	11	10	8	9	9	8	6	6	4	—
−6,3° C.	−60	10	6	10	**14**	**14**	10	9	8	7	7	7	7	7	5	3	3	—
−6,2° C.	−70	9	9	9	11	**13**	11	10	8	7	7	7	7	7	6	5	4	—
−6,2° C.	−70	6	7	**10**	**10**	9	9	8	9	7	6	6	6	5	6	5	—	—
−6,2° C.	−70	10	9	12	**13**	10	7	7	6	6	6	6	6	6	5	4	4	—
−6,2° C.	−70	10	**13**	12	11	10	10	9	10	9	7	7	6	5	5	6	5	—
−6,2° C.	−70	—	8	7	7	8	8	9	8	7	7	7	7	8	8	8	6	—

Todespunkt bei −6,9° C.

Tabelle XIV (siehe Text Seite 26).

a) 1 Skalenteil = 0,070° C.

6. *Agave americana*.

Todespunkt bei —5,7° C.

Nullpunkt	Todespunkt	—3,5°									—7,0°							—10,5°				—14,0°			
		+10	0	— 10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
0.0° C.	—5,7° C.	6″	*90″*	40″	30″	23″	5″	**31″**	21″	17″	16″	17″	16″	12″	7″	7″	7″	7″	7″	8″	7″	8″	9″	—	—
		—	—	*34*	23	20	19	16	**30**	**30**	23	17	15	11	8	8	8	8	7	8	8	8	—	—	—
		5	*55*	30	15	8	7	6	7	24	**31**	19	11	10	6	5	5	4	4	4	3	3	4	—	—
		—	*40*	13	8	7	6	6	7	13	**15**	11	9	6	4	4	4	3	2	3	3	3	3	—	—
		6	*33*	27	16	10	10	8	7	**23**	17	12	8	6	5	4	3	3	3	3	2	2	3	2	3
		4	25	*37*	22	12	9	6	9	**36**	27	15	9	8	6	5	5	4	4	4	3	4	3	—	—
		5	35	*50*	37	28	20	25	**50**	45	35	21	15	10	7	7	6	5	6	7	6	5	5	4	4
		4	*40*	*40*	20	10	8	6	16	**36**	30	20	13	8	7	5	4	4	4	4	4	3	4	3	—

Vergleiche Bemerkung von Tabelle XIa. Todespunkt —5,7° C.

b) 1 Skalenteil = 0,0166° C.; Kühlstelle $ZnSO_4$ + Eis.

Nullpunkt	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																									
		240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	— 20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
	Skalenteil																									
—6,00° C.	+18	**11″**	**11″**	10″	10″	10″	9″	11″	10″	9″	7″	7″	7″	6″	5″	6″	6″	6″	6″	6″	5″	5″	5″	4″	4″	5″
—5,80° C.	+6	4	7	8	6	5	7	7	6	7	**10**	8	*9*	8	8	7	8	6	6	6	6	5	5	4	—	—
—5,30° C.	—24	16	**20**	16	13	11	10	10	9	6	6	7	6	6	7	8	6	6	6	6	6	7	7	5	7	5
—5,50° C.	—12	—	—	—	**19**	11	9	8	6	6	7	6	6	7	8	6	7	8	6	7	7	7	8	8	10	—
—5,2° C.	—30	**23**	15	10	9	6	6	5	6	5	7	7	7	7	6	7	7	8	8	9	10	9	10	11	—	—
—5,0° C.	—36	**27**	25	20	13	11	8	7	8	7	6	5	6	6	7	6	7	7	9	9	12	14	—	—	—	—

Todespunkt —5,7° C.

c) 1 Skalenteil = 0,0077° C.; Kühlstelle $ZnSO_4$ + Eis.

Nullpunkt	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																	
		240	210	180	150	120	90	60	+30	0	—30	60	90	120	150	180	210	240
	Skalenteil																	
—6.0° C.	+39	6″	6″	7″	7″	6″	6″	5″	*4″*	4″	5″	5″	4″	3″	4″	4″	3″	4″
		5	6	7	7	7	7	5	*5*	5	6	5	6	5	6	5	5	—
		4	4	4	4	5	4	4	*5*	4	4	3	2	3	3	3	2	3
		5	6	7	7	6	5	6	*5*	5	4	4	4	5	4	4	5	4

Todespunkt —5,7° C.

Tabelle XV (siehe Text Seite 26).

a) 1 Skalenteil = 0,0926° C. — 7. *Tradescantia virginica* (Stengel) — Todespunkt —5,5° C.

Nullpunkt	Todespunkt berechnet bei	0°			—4,65°			—9,3°						—13,95°							—18.6°	
		Skalenteile																				
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
bei 0,0° C.	—5,5° C. = —60 Skalenteilen	9″	*60″*	22″	17″	17″	**45″**	43″	22″	18″	**14″**	13″	9″	10″	9″	8″	7″	—	—	—	—	—
		8	*41*	30	17	12	13	**29**	23	19	16	11	9	9	8	7	6	—	—	—	—	—
		—	*36*	18	12	5	10	**18**	16	16	16	13	9	9	7	6	6	6	5	5	—	—
		8	*35*	20	19	15	22	**26**	15	11	10	9	6	4	4	4	3	3	3	3	3	3
		7	*41*	23	11	9	**21**	20	18	14	13	10	7	7	4	4	4	4	4	4	4	3
		4	*49*	21	12	5	10	**17**	17	16	16	13	9	9	7	6	6	5	—	—	—	—
		7	7	*19*	8	6	4	**18**	15	15	10	8	7	5	5	4	4	4	3	3	3	3

Todespunkt —5,5° C.

b) 1 Skalenteil = 0,0202° C.

Nullpunkt $ZuSO_4$ + Eis	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																							
		230	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	+10	0
	Skalenteile																								
—6,5° C.	+50	12″	13″	11″	8″	8″	6″	4″	4″	6″	7″	5″	**10″**	7″	7″	5″	6″	6″	6″	6″	6″	6″	6″	5″	5″
—6,4° C.	+45	—	—	25	13	10	7	6	**10**	8	**10**	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	3	4	5	4
—6,3° C.	+40	35	15	13	10	11	11	10	7	8	8	7	6	8	**9**	8	8	7	7	7	6	7	7	7	6
—6,1° C.	+30	10	7	7	6	8	7	7	8	6	8	10	10	11	12	**14**	13	12	10	10	10	9	9	10	8

Todespunkt —5,5° C.

Nullpunkt $ZnSO_4$ + Eis	Todespunkt berechnet bei	Skalenteile																	
		0	—10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	
	Skalenteile																		
—6,5° C.	+50	5″	5″	4″	5″	4″	4″	4″	3″	3″	3″	4″	3″	4″	4″	5″	4″	3″	
—6,4° C.	+45	4	4	5	4	4	3	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—6,3° C.	+40	6	5	5	5	5	5	4	4	3	3	4	3	3	4	3	—	—	
—6,1° C.	+30	8	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	3	

Tabelle XVII (siehe Text Seite 27).

1 Skalenteil = 0,0926° C. — 1. *Saxifraga crassifolia.* — Temperaturkurve bis —40° C.

Nullpunkt [KCl + Eis]	—1,40°				—6,05°			—10,7°			—15,35°				—20,0°					—24,65°					—29,30					—33,0°				
	Skalenteile																																	
	+100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	—10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
—10,7° C.	30″	14″	10″	11″	32″	**66**″	25″	20″	12″	11″	8″	7″	6″	6″	5″	5″	5″	4″	5″	4″	5″	4″	4″	4″	4″	5″	6″	5″	6″	6″	—	—	—	—	—
	—	—	8	18	39	**60**	27	19	10	8	9	8	7	7	**7**	4	4	4	5	4	4	5	5	4	4	5	3	5	4	4	3	4	3	—	—
	—	—	—	—	—	—	59	**75**	53	23	14	11	8	6	5	5	4	4	3	4	3	3	2	3	3	2	3	3	4	3	4	4	3	4	5
	—	—	—	—	—	—	—	—	**38**	22	22	15	8	7	5	4	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	4	4	5	4	5	5	4	5	4

Todespunkt —12,6° C.

1 Skalenteil = 0,0926° C. — 2. *Helleborus hybridus.* — Temperaturkurve bis —33° C.

Nullpunkt [KCl + Eis]	+6,44°			+0,86°			—4,72°			—10,3°			—15,88°			—21,4°			—27,0°			—33,0°												
	Skalenteile																																	
	160	140	120	100	80	60	40	+20	0	—20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240													
—10,3° C.	17″	13″	22″	20″	23″	**40**″	**40**″	37″	17″	16″	11″	10″	10″	10″	10″	9″	7″	7″	9″	10″	12″														
	—	—	—	15	11	10	15	26	**53**	23	21	11	11	11	10	10	9	8	7	7	10														
	—	—	—	20	16	11	14	30	**47**	27	20	12	10	9	10	9	9	7	9	10	11														
	—	—	—	8	8	9	15	35	**38**	22	15	14	10	9	9	8	9	10	11	13	13														

Todespunkt —11,6° C.

1 Skalenteil = 0,0926° C.

3. *Yucca filamentosa.*

Temperaturkurve bis —33° C.

Nullpunkt [KCl — Eis]	—0,6°				—5,3°					—10,0°		—14,7°								—19,4°								—24,1°								—28,8°				—32,5°
	Skalenteile																																								
	+100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	—10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240					
—10,0° C.	12″	22″	**23″**	15″	16″	15″	14″	13″	13″	14″	14″	11″	9″	9″	7″	6″	6″	6″	7″	7″	6″	5″	6″	5″	4″	5″	4″	4″	3″	4″	3″	—	—	—	—					
	—	—	**13**		12	—	12		10				9	—	8		7		7	—	6		6		**4**	—	5		4		4	—	3		4					
	9	5	12		**30**	—	24		15				12	—	8		6		5	—	4		5		4	—	4		4		3	—	4		4					
	—	7	7		**26**	—	15		9				8	—	7		5		5	—	4		4		4	—	4		3		4	—	3		3					
	—	—	—		—	**32**	—		22				—	5	—		4		—	5	—		4		—	4	—		3		—	4	—		**3**					
	—	—	—		**30**	—	—		25				—	—	7		—		7	—	—		6		—	—	4		—		6	—	—		—					
	—	—	—		**42**	—	—		18				—	—	13		—		12	—	—		7		—	—	6		—		6	—	—		6					
	—	—	—		**38**	—	—		22				—	—	10		—		7	—	—		5		—	—	5		—		5	—	—		5					
	—	—	—		**38**	—	—		22				—	—	12		—		7	—	—		6		—	—	6		—		6	—	—		6					

Todespunkt —10,9° C.

1 Skalenteil = 0,2° C.

4. *Anemone japonica.*

Temperaturkurve bis —30° C.

Nullpunkt —6.0° C. [Rohrzucker + Eis]	+4,0°				—6,0°			—16,0°								—26,8°							—36,0°					
	Skalenteile																											
	50	40	30	20	+10	0	—10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170					
Todespunkt —7,2° C.	5″	44″	47″	18″	17″	40″	35″	15″	11″	9″	9″	9″	9″	7″	9″	9″	10″	10″	—	—	—	—	—					
	—	—	25	17	15	20	38	19	13	10	7	5	6	6	6	6	6	7	8	—	—	—	—					
	—	—	—	11	14	15	15	14	12	7	5	5	6	6	5	7	8	8	9	—	—	—	—					

Todespunkt —7,2° C.

Tabelle XVIII (siehe Text Seite 31).

1 Skalenteil = 0,070° C.
Nullpunkt 0,0°.

Temperaturkurve des Preßsaftes von *Agave americana*.

1. Preßsaft roh.

−7,0°					−3,5°					0°						−3,5°						−7,0°						−10,5°						−14,0°
Skalenteile																																		
−100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200				
6″	6″	7″	8″	9″	10″	8″	8″	13″	13″	**18″**	—	—	sehr schneller Abfall																					
—	—	7	8	8	11	10	10	13	14	24	**44**	—	11	—	9	—	10	—	10	—	10	—	10	—	11	—	—	—	—	—				
6	5	9	10	8	8	11	13	13	22	**50**	36	13	7	7	6	5	6	5	5	5	4	3	3	3	4	3	2	2	—	—				
7	6	5	11	11	10	13	15	20	24	**75**	62	7	5	4	4	3	3	4	3	3	4	3	4	3	3	4	3	3	—	—				
—	—	—	—	8	10	10	11	14	20	**80**	13	9	7	6	6	7	5	4	4	4	5	5	4	4	3	—	—	—	—	—				
—	—	—	—	—	10	9	10	25	58	**87**	10	5	4	5	4	4	4	4	5	4	4	5	5	4	4	—	—	—	—	—				

2. Preßsaft gereinigt (aufgekocht, filtriert).

—	—	—	8″	11″	15″	18″	14″	23″	19″	**32″**	20″	6″	5″	5″	5″	4″	5″	5″	4″	4″	5″	5″	4″	4″	4″	5″	5″	4″	—	—				
—	—	—	—	6	5	6	5	5	6	**12**	4	—	sehr schneller Abfall																					
—	6	7	8	8	9	10	10	9	14	**17**	5	—	sehr schneller Abfall																					
—	—	—	—	—	15	15	17	20	12	**24**	12	—	5	—	4	—	4	—	4	—	4	—	5	—	4	—	4	—	4	—				
—	—	—	—	—	7	9	6	6	8	7	**8**	—	5	—	5	—	6	—	5	—	4	—	5	—	5	—	6	—	5	—				
—	—	—	—	—	—	—	13	14	14	**21**	13	11	9	7	7	7	8	7	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
—	—	—	—	—	5	4	4	3	8	**11**	8	4	4	3	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	3	4	—	—	—				
—	—	—	—	—	8	8	9	11	12	**19**	10	6	6	5	5	4	4	5	4	4	4	4	4	5	4	4	—	—	—				
—	—	7	7	5	4	3	5	5	**11**	5	4	5	4	4	4	4	3	3	3	4	4	5	4	3	4	5	4	3	4	—				
—	—	7	7	8	9	13	16	17	15	**30**	15	10	9	10	8	8	9	8	6	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—				

Tabelle XIX (s. Anmerkung p. 58).

1 Skalenteil = 0,070° C.

Nullpunkt 0,0° C.

1. *Agave americana.*

Temperaturkurve der Chlorophyllschicht.

Todespunkt bei — 95 Skalenteilen.

Anzahl der Sekunden, die das Objekt braucht, um von dem angegebenen Skalenteil um weitere 10 Skalenteile (= 0,7°) zu fallen.	0°				−3,5°						−7,0°							−10,5°						−14,0°	Beginn des Gefrierens bei Skalenteil	Eutektischer Punkt bei Skalenteil
	Skalenteile																									
	+20	10	0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200			
	4″	2″	*42″*	11″	10″	8″	7″	6″	9″	10″	**14″**	11″	10″	10″	10″	10″	10″	—	—	—	—	—	—		−8	−80
	—	4	*20*	17	9	8	5	7	9	**20**	11	9	9	8	9	9	6	5	5	6	5	4	5		−8	−70
	—	—	*35*	25	7	4	4	5	4	6	**10**	6	4	6	4	3	4	3	3	4	4	4	3		−8	−80
	—	5	5	*25*	5	3	2	5	**15**	10	5	5	5	**4**	5	5	4	3	3	4	3	—	—		−11	−60
	3	2	5	*25*	9	9	6	5	9	11	**10**	5	5	5	5	5	5	4	3	3	2	3	2		−11	−70
	4	4	7	*31*	12	9	4	7	8	**13**	11	8	6	6	7	6	5	4	4	3	—	—	—		−13	−70
	5	3	9	*25*	6	5	6	10	9	6	10	**15**	10	10	6	4	5	5	—	—	—	—	—		−11	−90
	4	3	7	*51*	11	11	9	9	**15**	13	12	11	8	8	8	5	6	4	3	3	2	—	—		−10	−60
	5	5	9	*37*	14	7	4	3	3	3	2	9	11	**14**	9	9	9	7	7	6	6	5	—		−11	−110
	—	—	8	*43*	12	6	5	4	4	2	10	**14**	7	8	4	3	3	4	3	3	2	3	—		−10	−90
	—	3	*27*	11	5	4	2	3	3	3	2	4	6	**14**	12	5	5	6	4	4	4	4	4		−8	−110
	4	4	*41*	10	8	8	7	5	5	5	10	**14**	11	8	7	8	11	11	13	15	—	—	—		−8	−80
																								Durchschnitt bei Skalenteil	−9,8	−80,9

Temperaturkurve des Wassergewebes.

Todespunkt bei −85 Skalenteilen.

	3″	5″	*44″*	15″	7″	7″	6″	13″	**22″**	15″	13″	8″	5″	4″	3″	2″	2″	2″	2″	3″	2″	—	—	−8	−60
	—	—	*32*	10	4	4	3	13	**17**	8	7	4	5	4	4	4	4	3	3	3	4	4	2	−9	−60
	3	4	16	*31*	9	10	9	10	**26**	23	11	8	6	4	3	3	3	2	3	2	3	2	2	−10	−60
	4	2	14	*56*	8	6	7	11	**17**	16	9	7	4	4	4	2	2	2	2	1	2	1	—	−10	−60
	7	2	*19*	18	7	6	6	9	**21**	15	14	7	7	6	5	4	4	3	2	2	2	2	—	−9	−60
	—	8	13	*30*	14	9	6	10	**20**	14	8	8	8	6	4	3	4	3	3	3	3	3	—	−10	−60
																								Durchschnitt bei Skalenteil	−9,3	−60,0

1 Skalenteil = 0,070° C.

Nullpunkt 0,0° C.

2. *Euphorbia antiquorum.*

Temperaturkurve der Chlorophyllschicht.

Todespunkt bei —133 Skalenteile.

0°							—3,5°			—7,0°					—10,5°							—14,0°	Beginn des Gefrierens bei Skalenteil	Eutektischer Punkt bei Skalenteil
Skalenteile																								
+20	10	0	—10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200		
—	—	*33″*	30″	11″	7″	4″	4″	4″	5″	12″	**32″**	29″	14″	8″	4″	3″	3″	2″	2″	2″	2″	—	—8	—90
—	—	5	*37*	6	5	5	4	5	5	9	20	**21**	10	5	5	3	3	3	2	2	2	1	—11	—100
—	—	*45*	15	5	4	4	3	3	4	12	**20**	17	11	9	7	7	5	4	3	3	3	3	—9	—90
—	—	*23*	6	5	4	4	3	3	2	2	**6**	5	5	4	4	3	4	3	3	—	—	—	—9	—90
—	—	17	*30*	5	5	3	3	3	6	**9**	6	4	4	5	4	3	3	2	3	2	2	1	—11	—80
—	—	5	*51*	9	7	5	4	6	10	12	**38**	30	9	10	6	6	6	6	6	4	4	—	—12	—90
																						Durchschnitt bei Skalenteil	—10	—90

Temperaturkurve des Wassergewebes.

Todespunkt bei —82 Skalenteile

—	—	9″	*41″*	14″	8″	7″	**8″**	5″	6″	6″	5″	6″	5″	5″	4″	4″	6″	8″	9″	–	—	—	—10	—50
—	—	13	*18*	9	9	**11**	6	4	5	3	3	3	2	2	1	2	1	2	1	—	—	—	—12	—40
—	—	16	*41*	13	**21**	10	4	3	3	2	3	3	2	2	2	1	2	2	1	1	2	1	—10	- 30
—	—	9	*23*	6	6	**9**	6	5	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2	—	—11	—40
—	—	6	*58*	8	8	6	**9**	7	6	5	5	4	3	3	2	2	2	1	1	1	—	—	—11	—60
																						Durchschnitt bei Skalenteil	—10,8	—54

Die schräg-fetten Ziffern geben die Abkühlungsgeschwindigkeit beim Beginn des Gefrierens an (Ausscheiden reinen Eises); die fetten Ziffern dagegen die Abkühlungsgeschwindigkeit beim eutektischen Punkt (Ausscheiden von Eis und Salzen).

1 Skalenteil = 0,070° C.
Nullpunkt 0,0° C.

3. *Gasteria carinata.*

Temperaturkurve der Chlorophyllschicht.

0°				−3,5°							−7,0°					−10,5°					−14,0°		Beginn des Gefrierens bei Skalenteil	Eutektischer Punkt bei Skalenteil
Skalenteile																								
+20	10	0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200		
3″	6″	4″	*61″*	4″	4″	4″	3″	5″	9″	10″	**10″**	**10″**	10″	7″	6″	4″	5″	4″	3″	3″	3″	2″	−12	−100
4	3	4	*20*	9	4	6	5	3	3	7	5	8	**10**	9	6	4	2	2	2	2	2	1	−15	−110
3	2	7	*23*	8	5	5	3	3	3	4	5	4	5	5	**8**	6	2	2	1	—	—	—	−16	−130
5	8	*31*	21	7	2	4	3	7	8	7	5	6	8	**9**	5	6	5	3	3	2	—	—	−8	−120
—	—	21	*22*	8	6	3	4	5	6	5	7	7	8	**8**	8	5	4	3	2	2	2	—	−8	−120
—	3	5	*22*	9	4	4	4	7	**8**	7	7	6	5	5	4	3	3	2	2	—	—	—	−17	−70
—	—	4	*28*	16	9	10	**11**	10	5	6	5	4	4	4	2	2	2	**2**	—	—	—	—	−15	−50
3	4	5	*34*	12	9	6	6	4	6	6	5	7	**9**	**9**	6	4	5	5	4	—	—	—	−15	−110
4	6	5	*50*	16	14	10	15	20	19	16	**19**	13	18	10	10	5	5	5	5	—	—	—	−15	−90
																							Durchschnitt bei Skalenteil	−13,4	−100

Temperaturkurve des Wassergewebes.

2″	4″	*54″*	11″	10″	**20″**	**20″**	10″	5″	3″	2″	2″	1″	2″	1″	1″	1″	—	—	—	—	—	—	−3	−35
10	7	*47*	24	8	7	9	**17**	**17**	11	5	5	5	3	2	2	1	1	1	—	—	—	—	−7	−50
5	5	*55*	26	14	12	12	**16**	15	14	6	4	3	2	2	2	2	2	2	3	—	—	—	−8	−50
4	2	*27*	13	7	9	**17**	16	10	5	5	4	4	4	2	2	3	2	2	2	—	—	—	−8	−40
4	5	*61*	25	15	20	**35**	9	6	4	2	2	3	2	2	1	2	2	—	—	—	—	—	−8	−40
4	6	*66*	35	40	**53**	22	12	7	6	5	4	4	2	2	3	2	2	—	—	—	—	—	−8	−30
																							Durchschnitt bei Skalenteil	−5,6	−40

1 Skalenteil = 0,070° C.
Nullpunkt 0,0° C.

4. *Aloe distans.*

Temperaturkurve der Chlorophyllschicht. Todespunkt bei — 150 Skalenteilen.

0°							−3,5°				−7,0°					−10,5°						−14,0°		Beginn des Gefrierens bei Skalenteil	Eutektischer Punkt bei Skalenteil
											Skalenteile														
+20	10	0	−10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200		
—	—	5″	*30″*	10″	5″	4″	3″	3″	3″	4″	3″	5″	5″	6″	**7″**	4″	5″	3″	2″	2″	—	—	−13	−130
—	7	15	*20*	6	6	3	5	3	3	3	3	3	4	5	**9**	6	6	4	4	3	3	—	−10	−130
5	6	5	*47*	11	9	3	3	4	3	3	3	3	6	6	**7**	**8**	5	6	6	4	4	3	−15	−140
—	—	10	*25*	8	6	4	4	4	3	3	4	3	6	6	7	7	**8**	7	8	7	5	4	−15	−150
—	—	10	*25*	11	7	3	2	2	2	2	2	1	3	**5**	**5**	4	3	2	2	2	2	2	−12	−110
3	2	5	*24*	8	4	4	3	3	3	3	3	4	5	4	7	**9**	6	4	2	3	3	2	−16	−140
																		Durchschnitt bei Skalenteil					−13,5	−133

Temperaturkurve des Wassergewebes. Todespunkt bei — 80 Skalenteilen

—	5″	*68″*	31″	26″	22″	**28″**	19″	11″	10″	9″	10″	9″	6″	6″	6″	5″	5″	5″	4″	3″	4″	4″	−5	−40
—	4	*30*	15	15	14	**15**	12	14	13	12	6	4	4	4	2	2	2	1	3	—	—	—	−5	−40
6	4	*29*	31	**34**	15	11	9	5	5	5	5	3	3	4	3	3	3	2	2	2	2	—	−5	−20
5	5	7	*35*	**40**	33	11	8	4	5	5	4	3	3	4	2	—	—	—	—	—	—	—	−8	−20
8	7	*16*	14	12	15	16	**18**	15	10	5	5	4	2	2	2	2	3	2	2	2	—	—	−4	−60
—	5	*52*	**43**	24	15	10	6	4	4	3	2	2	3	2	2	—	—	—	—	—	—	—	−5	−20
5	5	*65*	**26**	**15**	10	9	6	4	4	3	—	5	—	3	—	3	—	4	—	4	—	—	−6	−20
																		Durchschnitt bei Skalenteil					−5,3	−31

Lebenslauf.

Hans Voigtlaender wurde am 16. Mai 1882 zu Neundorf (Herzogtum Anhalt) geboren. Seine Eltern sind der Rektor Julius Voigtlaender und dessen Ehefrau Marie, geb. Fricke. Er gehört der evangelischen Konfession an. Seinen ersten Unterricht erhielt er in Köthen, wo er später auch das Ludwigs-Gymnasium besuchte. Ostern 1897 ging er auf das Herzogliche Francisceum zu Zerbst über, welches er Ostern 1903 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Zunächst studierte er dann zwei Semester in Marburg, die übrigen Semester an der Universität Halle Naturwissenschaften.

Während seines Studiums hat er bei folgenden Herren Professoren und Dozenten an Vorlesungen und Übungen teilgenommen:

Haller, Hensel, Heß, Richarz, Sieveking, v. Sybel, Zincke in Marburg, *Brandes, Doebner, Dorn, Ebbinghaus, Eberhard, Fries, Grenacher, Klebs, Luedecke, Mez, Noll, Riehl, Taschenberg, Vaihinger, Volhard, Wüst, Walther* in Halle.

Allen diesen Herren, seinen hochverehrten Lehrern, spricht er seinen ehrerbietigsten Dank aus.